

Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»
(СПбГУ)
Институт Наук о Земле
Кафедра минералогии

Головки Ольга Владимировна

**Минералогия и условия образования
щелочных пегматитов Сагасен, Норвегия**

**Бакалаврская работа
по направлению 050301 «Геология»**

Заведующий кафедрой минералогии:
проф., д.г-м.н, Брусницын А. И.

Научный руководитель:
ассистент кафедры минералогии,
к.г-м.н, Верещагин О. С.

Рецензент:
старший научный сотрудник
Южно-Уральского научного центра,
к.г-м.н, Медведева Е. В.

Санкт-Петербург
2019

Оглавление

Введение	3
Методические указания	5
1. Литературный обзор	10
1.1 Щелочные породы и их пегматиты	10
1.2 Геологическая позиция и минералогия пегматитов Сагасен	11
1.2.1 Регионально-геологическая характеристика района	11
1.2.2 Плутонический комплекс Ларвик	13
1.2.3 Пегматиты карьера Сагасен и другие пегматиты комплекса	15
1.3 Миаскитовые пегматиты Ильменских гор	19
2. Объекты исследования	20
2.1 Пегматиты карьера Сагасен	20
2.2 Миаскитовые пегматиты Ильменских гор	23
3. Методы исследования	25
3.1 Оптическая микроскопия	25
3.2 Порошковая рентгенография	25
3.2.1 Определение параметров элементарной ячейки методом Ритвельда	25
3.3 Электронная микроскопия и электронно-зондовый микроанализ	25
3.4 Рамановская спектроскопия	26
3.5 Определение термодинамических параметров по химическому составу минералов, их свойствам и ассоциациям (минеральные геотермометры)	26
3.5.1 Полевые шпаты: микроклин, альбит	26
3.5.2 Нефелин	27
3.5.3 Магнетит — ильменит	28
4. Результаты исследования	30
4.1 Оптическая микроскопия	30
4.2 Порошковая рентгенография	36
4.3 Электронная микроскопия и электронно-зондовый микроанализ	40
4.3.1 Главные породообразующие минералы	40
4.3.2 Акцессорные минералы	42
4.4 Рамановская спектроскопия	50
4.5 Минеральные геотермометры	56
4.5.1 Полевые шпаты	56
4.5.2 Нефелин	59
4.5.3 Магнетит — ильменит	62

5. Обсуждение результатов	64
5.1 Порядок кристаллизации пегматитов Сагасен. Генетическая диаграмма	64
5.2 Сравнение пегматитов Сагасен с миаскитовыми пегматитами Ильменских гор .	65
Заключение	69
Приложение	70
Список литературы	70

Введение

Актуальность темы. Пегматиты Сагасен в Норвегии — один из ярких примеров, иллюстрирующих минералогическое разнообразие и уникальность пегматитов щелочных пород. В связи с этим, пегматиты Сагасен представляют собой научный интерес. В пегматитах Сагасен и в других пегматитах Лангесунфьорда был открыт 31 минерал (Müller et al., 2017; Larsen, 2010). Однако, несмотря на детальную изученность минералогии пегматитов, условия их образования исследованы недостаточно. Термодинамические параметры ранее не были определены, остается дискуссионной связь пегматитов с вмещающими породами (Larsen, 2010; Sunde et al., 2018).

Пегматиты содержат большое количество минеральных фаз, концентрирующих Nb, Y, редкоземельные элементы (REE), Th. Изучение формы нахождения и особенностей распределения вышеперечисленных элементов позволит оценить пегматиты как потенциальный источник для добычи этих полезных ископаемых.

Цель. получить новые сведения о главных и акцессорных минералах пегматитов Сагасен и на основании этого определить термодинамических условий образования пегматитов.

Основные задачи.

1. Составить литературный обзор по геологической позиции и минералогии пегматитов Сагасен и других пегматитов Лангесунфьорда. Рассмотреть вопросы классификации пегматитов щелочных пород.
2. Изучить минеральный и химический состав образцов пегматитов Сагасен: выявить главные и акцессорные минералы; их особенности.
3. Установить пространственно-временные взаимоотношения между минералами, определить порядок кристаллизации минералов
4. Подобрать минералы-геотермометры и рассчитать термодинамические параметры образования пегматитов (температура, давление, фугитивность кислорода).
5. Сравнить пегматиты Сагасен с другими щелочными пегматитами.

Благодарности. Работа выполнена под руководством к.г.-м.н., ассистента кафедры минералогии Олега Сергеевича Верещагина, которому автор выражает благодарность за всестороннее участие в работе на всех ее этапах.

Автор благодарит д.г.-м.н. Зайцева А. Н. за ценные рекомендации и указания к работе, а также других сотрудников кафедр минералогии и кристаллографии Института Наук о Земле за помощь на различных этапах исследования: д.г.-м.н. Брусницына А. И.,

к.г.-м.н. Перову Е. Н., к.г.-м.н. Семенову Т. Ф., Ветрову М. Н., к.г.-м.н. Платонову Н. В., к.г.-м.н. Пономареву Н. И.

Также автор признателен сотрудникам Южно-Уральского научного центра (г. Миасс) за помощь в проведении сравнительного анализа пегматитов Сагасен с миаскитовыми пегматитами Ильменских гор и организацию практики на территории Ильменского заповедника: Рассомахину М. А., к.г.-м.н. Медведевой Е. В., д.г.-м.н. Белогуб Е. В.

За возможность прохождения летних практик в Южной Норвегии и на Южном Урале, в ходе которых были отобраны образцы для исследования, автор благодарит руководителей практик и отдел практик СПбГУ.

Работы выполнены на оборудовании РЦ СПбГУ.

Методические указания

В тексте работы и в иллюстрациях использованы следующие сокращения:

1. Ab — альбит (albite)
2. Aeg — эгирин (aegirine)
3. Anc — анальцим (analcime)
4. Amf — амфибол (amphibole)
5. Ann — аннит (annite)
6. alk — приставка, обозначающая щелочность
7. Bab — бадделеит (baddeleyite)
8. Bn — бастнезит (bastnäsite)
9. Brn — бренкит (brenkite)
10. Bur — бурбанкит (burbankite)
11. Ca — кальцит (calcite)
12. Ce — церит-(Ce) (cerite-(Ce))
13. Cl — хлорит (clorite)
14. Ct — катаплеит (catapliete)
15. Eud - эвдиалит (eudialyte)
16. Il — ильменит (ilmenite)
17. Hm — гематит (hematite)
18. Fl — флюорит (fluorite)
19. Fsp — полевой шпат (feldspar)
20. Ka-Y — кайнозит-(Y) (kainosite-(Y))
21. $K_{агп}$ — коэффициент агпаитности
22. Kps - куплескит (kupleskite)
23. Kt - катаплеит (catapleite)
24. Lv - ловенит (låvenite)
25. Mi — микроклин (microcline)
26. Mt — магнетит (magnetite)
27. Mu — мусковит (muscovite)
28. Mz — монацит-(Ce) (monazite)
29. Ne — нефелин (nepheline)
30. Pc — пирохлор (pyrochlore)
31. Pct — пектолит
32. Pph — пирофанит (pyrophanite)
33. Qz — кварц (quartz)
34. Th — торит (thorite)
35. Thn — торианит (thorianite)

36. Usp — ульвошпинель (ulvospinel)
 37. Wh — вёлерит (wöhlerite)
 38. о. — остров
 39. КЧ — координационное число
 40. п-о. — полуостров
 41. ф. к. — формульный коэффициент

Таблица 1. Формулы минералов

Название	Формула	Сокращение
Тип: сернистые соединения и их аналоги		
Класс: простые сульфиды		
Галенит	PbS	
Сфалерит	ZnS	
Молибденит	MoS_2	
Тип: кислородные соединения		
Класс: простые оксиды		
Бадделеит	ZrO_2	bad
Торианит	ThO_2	thn
Класс: сложные оксиды		
Ильменит	$FeTiO_3$	il
Пирофанит	$MnTiO_3$	pph
Магнетит	$FeFe_2O_4$	mt
Хансэсмаркит	$Ca_2Mn_2Nb_6O_{19} \cdot 20H_2O$	pc
Группа пирохлора		
Гидроксокальцопирохлор	$CaNb_2O_6F$	pc
Фторкальцопирохлор	$CaNb_2O_6OH$	pc
Фторнатропирохлор	$(Na, Ca)Nb_2O_6F$	pc
Класс: Силикаты и их аналоги		
Подкласс: силикаты островной структуры		
Циркон	$Zr(SiO_4)$	zr
Торит	$Th(SiO_4)$	th
Церит-(Ce)	$Ce_9(Mg, Fe)(SiO_4)_3(HSiO_4)_4(OH)_3$	ce
Титанит	$CaTi(SiO_4)O$	
Бритолит-(Ce)	$(Ce, Ca)_5(SiO_4)_3(OH)$	
Группа куспидина		
Вёлерит	$NaCa_2(Zr, Nb)(Si_2O_7)(O, OH, F)_2$	wh

Ловенит	$(Na, Ca)_2(Mn, Fe^{2+})(Zr, Ti, Nb)(Si_2O_7)(O, OH, F)_2$	lv
Подкласс: силикаты кольцевой структуры		
Кайнозит	$Ca_2(Y, Ce)_2Si_4O_{12}(CO_3)$	ka-(Y)
Катаплектит	$Na_2Zr(Si_3O_9) \cdot 2H_2O$	kt
Эвдиалит	$Na_{12}(Ca)_6Fe_3^{2+}Zr_3(Si_3O_9)(OH_3)_2$	eud
Подкласс: силикаты цепочечной структуры		
Группа пироксенов		
Эгирин	$NaFe(Si_2O_6)$	aeg
Группа волластонита		
Пектолит	$NaCa(Si_3O_8)(OH)$	pct
Серандит	$NaMn(Si_3O_8)(OH)$	
Группа астрофиллита		
Куплетскит	$(K, Na)_3(Mn, Fe)_7Ti_2Si_8O_{26}(OH)_4F$	kps
Подкласс: силикаты ленточной структуры		
Группа амфиболов		
Феррогорнблендит	$\square Ca_2(Fe_4^{2+}Al)(Si_7AlO_{22})(OH)_2$	hbl
Подкласс: силикаты и алюмосиликаты слоистой структуры		
Группа слюд		
Мусковит	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	mu
Аннит	$KFe_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	ann
Группа хлорита		
Шамозит	$(Fe_5^{2+}Al)(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	cl
Пеннантит	$(Mn_5^{2+}Al)(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	cl
Подкласс: каркасные алюмосиликаты		
Простые каркасные алюмосиликаты		
Микроклин	$K(AlSi_3O_8)$	mi
Альбит	$Na(AlSi_3O_8)$	ab
Нефелин	$Na_3K(AlSiO_4)_4$	ne
Каркасные алюмосиликаты с добавочными анионами		
Содалит	$Na_8(AlSiO_4)_6Cl_2$	sod
Канкринит	$Na_6Ca_2(AlSiO_4)_6(CO_3)_2 \cdot 3H_2O$	can
Водные каркасные алюмосиликаты (цеолиты)		
Анальцим	$Na(AlSi_2O_6) \cdot H_2O$	anc
Класс: фосфаты		
Монацит-(Ce)	$Ce(PO_4)$	mz

Ксенотим-(Y)	$Y(PO_4)$	
Фторапатит	$Ca_5(PO_4)_3F$	ap
Класс: карбонаты		
Кальцит	$Ca(CO_3)$	cal
Бастнезит	$Ce(CO_3)F$	bn
Бренкит	$Ca(CO_3)F$	brn
Бурбанкит	$(Na, Ca)_3(Sr, Ba, Ce)_3(CO_3)_5$	bur
Класс: фториды		
Флюорит	CaF_2	fl

Названия географических объектов и геологических подразделений в работе приведены на русском языке. Далее представлен список с оригинальным написанием и с вариантом перевода на русский язык:

1. Asker — Аскер; серия
2. Akershus Graben — Акерсхус; грабен
3. Bratthagen — Браттеген; тип пегматитов по [Larsen \(2010\)](#)
4. Kolsås — Колсас; свита серии аскер
5. Kongsberg — Конгсберг; город
6. Oslo — Осло; город
7. Oslofjorden — Ослофьорд; фьорд
8. Langesunfjord — Лангесунфьорд, фьорд
9. Langesun — Лангесун, зона
10. Låven — Лавен, остров в Лангесунфьорде
11. Lille Arøya — Лилль Арёй, остров в Лангесунфьорде
12. Rotliegende — Ротлигендес; комплекс
13. Rendalen — Рендален, грабен
14. Saga I — Сага I; карьер
15. Sagåsen — Сагасен; карьер
16. Solberg horst — Солберг, горст
17. Siktesøya — Сигтесёй, остров в Лангесунфьорде
18. Stavern — Ставерн; город, тип пегматитов по [Larsen \(2010\)](#)
19. Stålaker — Столакер, посёлок, тип пегматитов по [Larsen \(2010\)](#)
20. Skaugum — Скаугум; свита серии аскер
21. Skagerrak — Скагеррак, грабен
22. Porsgrunn — Порсгрунн; коммуна

- 23. Telemark — Телемарк; коммуна
- 24. Tvedalen — Тведален, тип пегматитов по [Larsen \(2010\)](#), карьер
- 25. Tuften — Туфтен, карьер
- 26. Vestfold — Вестволд, грабен
- 27. Vesle Arøya — Весле Арёй, остров в Лангесунфьорде
- 28. Vesterøya — Вестрой, полуостров

Глава 1

Литературный обзор

1.1 Щелочные породы и их пегматиты

В частности особое мое внимание привлекают пегматиты нефелиновых сиенитов, так как, по моему мнению, их геохимический анализ сможет пролить свет на происхождение этих интересных, но загадочных пород. Однако, именно в этом направлении мы наталкиваемся на огромные трудности, и четыре мировых месторождения – Южная Норвегия, Гренландия, Хибины и Ильменские горы.

А. Е. Ферсман
1931

Щелочные магматические породы обычно определяются наличием в них фельдшпатоидов (нефелина, лейцита, нозеана и др.) (Перчук, 2014). Содержание SiO_2 в них колеблется от 48 до 63 % (Жданов и др., 2009). Как и другие породы, эти породы подразделяют на ультраосновные (мелилитолит, ийолит, уртит и др.), основные (полевошпатовый ийолит, полевошпатовый уртит, тавит, фергусит), средние (щелочной сиенит, фойяит, луяврит, мариуполит, миаскит, сыннырит), кислые (щелочные граниты и граносиениты) (Жданов и др., 2009). Еще одним критерием классификации служит коэффициент агпаитности $K_{агп} = (Na_2O + K_2O)/(Al_2O_3) > 1$. На основании этого коэффициента средние щелочные породы можно разделить на миаскитовые ($K_{агп} \approx 1$), агпаитовые ($K_{агп} = 1 - 3$) и ультраагпаитовые ($K_{агп} = 3 - 10$) (Жданов и др., 2009).

Щелочные породы часто обогащены крупно-ионными литофильными элементами (LILE – Li, Na, K, Rb и Cs), галогенами (F, Cl, Br и I), высоко-зарядными (HFSE – Zr, Hf, Nb, Ta, U), редкоземельными элементами (REE), и такими элементами как Be, Sn, Zn и Ga. Следствием этого является большое разнообразие акцессорных фаз. Концентрация в магме перечисленных элементов приводит к образованию F- и Cl-содержащих минералов: вильямит, содалит, минералов группы эвдиалита, ринкита, велерита (Marks and Markl, 2017). Редкоземельные элементы часто рассеяны в кристаллических решетках циркона и титанита, апатита. Уран и торий замещают цирконий и кальций в минералах и являются причиной повышенной радиоактивности некоторых щелочных пород. Реже эти элементы формируют собственные фазы (Перчук, 2014; Marks and Markl, 2017; Piilonen et al., 2012).

Щелочной магматизм характерен для внутриплитных обстановок. В большинстве случаев щелочные магмы формируют вулканоплутонические комплексы. Интрузии дифференцированы; в них, как правило, преобладают миаскитовые породы, за редким ис-

ключением (Хибины, Ловозеро). При этом агпаитовые породы моложе миаскитовых, что подчеркивает необходимость длительной последовательной дифференциации магмы до достижения агпаитовой стадии ([Marks and Markl, 2017](#)).

Щелочные породы относительно редки. При этом они представляют большой экономический интерес, как концентраторы редкоземельных элементов, Nb, Ta и некоторых других.

Минералогическое разнообразие щелочных пород наилучшим образом демонстрируют их пегматиты. Наиболее известны щелочные пегматиты Хибин, Ловозера, Ильменских и Вишневых гор (Россия), Лангесунфьорда (Норвегия), Илимауссак (Гренландия). Из разнообразия щелочных пород следует разнообразие их пегматитов. В связи с гигантозернистым строением, классификация пегматитов на основании данных анализа валового химического состава затруднена. Определить тип пегматита позволяет использование минералов-индикаторов: циркон, ильменит, авгит и кальциевые амфиболы характерны для миаскитовых пегматитов, минералы группы эвдиалита, эгирин и натрово-кальциевые амфиболы - для агпаитовых ([Khomayakov, 1995](#); [Marks and Markl, 2017](#)).

1.2 Геологическая позиция и минералогия пегматитов Сага-сен

1.2.1 Регионально-геологическая характеристика района

Норвегия расположена на западе Фенноскандинавского щита, который включает в себя архейский кратон в центральной части, палеопротерозойские зеленокаменные пояса на северо-западе, и окаймляющие складчатые системы на юго-западе. Пояса разделены магматическими провинциями, образование которых происходило 1860-1650 млн. назад. Архейские и протерозойские породы в значительной степени покрыты надвиговыми пластинами каледонской складчатой системы и поздне-карбоновыми — ранне-триасовыми отложениями грабена Осло ([Ihlen et al., 2014](#), [Karin et al., 2004](#)).

С грабеном Осло связано множество уникальных геологических объектов и месторождений полезных ископаемых ([Larsen et al., 2008](#)).

Согласно работе [Larsen et al. \(2008\)](#), рифт Осло состоит из нескольких грабенов: Рендален, Акерсхус, Вестфолд, Скагеррак (рис. 1.1). В рифтогенезе выделяют 6 стадий развития. Ранние породы — осадочные, а поздние — магматические и вулканические, связанные непосредственно с рифтогенезом (табл. 1.1).

На первой стадии рифтообразования накапливались песчано-глинистые породы, на второй — вулканогенно-осадочный материал и базальты. Излияние лав, сформировавших мощные толщи щелочных базальтов с порфировой структурой (ромбовых порфиров), относятся к третьей стадии. Выделяют 20 типов лавовых потоков, различных по структурно-текстурным признакам. Мощность толщи в некоторых районах достигает

3 километров. Кульминацией третьей стадии является внедрение главных сиенитовых батолитов: Ларвик — в южной части и Нордмарк — в северной (рис. 1.1) (Larsen et al., 2008). Четвертая стадия связана с активным щелочным вулканизмом. Во многих частях рифта извергаются вулканы центрального типа, образуются кальдеры. Для пятой стадии характерна магматическая активность: внедряются щелочные гранитные и сиенитные интрузии (нордмакиты, экериты). Развитие рифта завершается внедрением гранитных интрузий в раннем триасе (пятая — шестая стадии) (табл. 1.1). Таким образом, геологические процессы, связанные с рифтом Осло, продолжались около 65 млн. лет (Larsen et al., 2008).

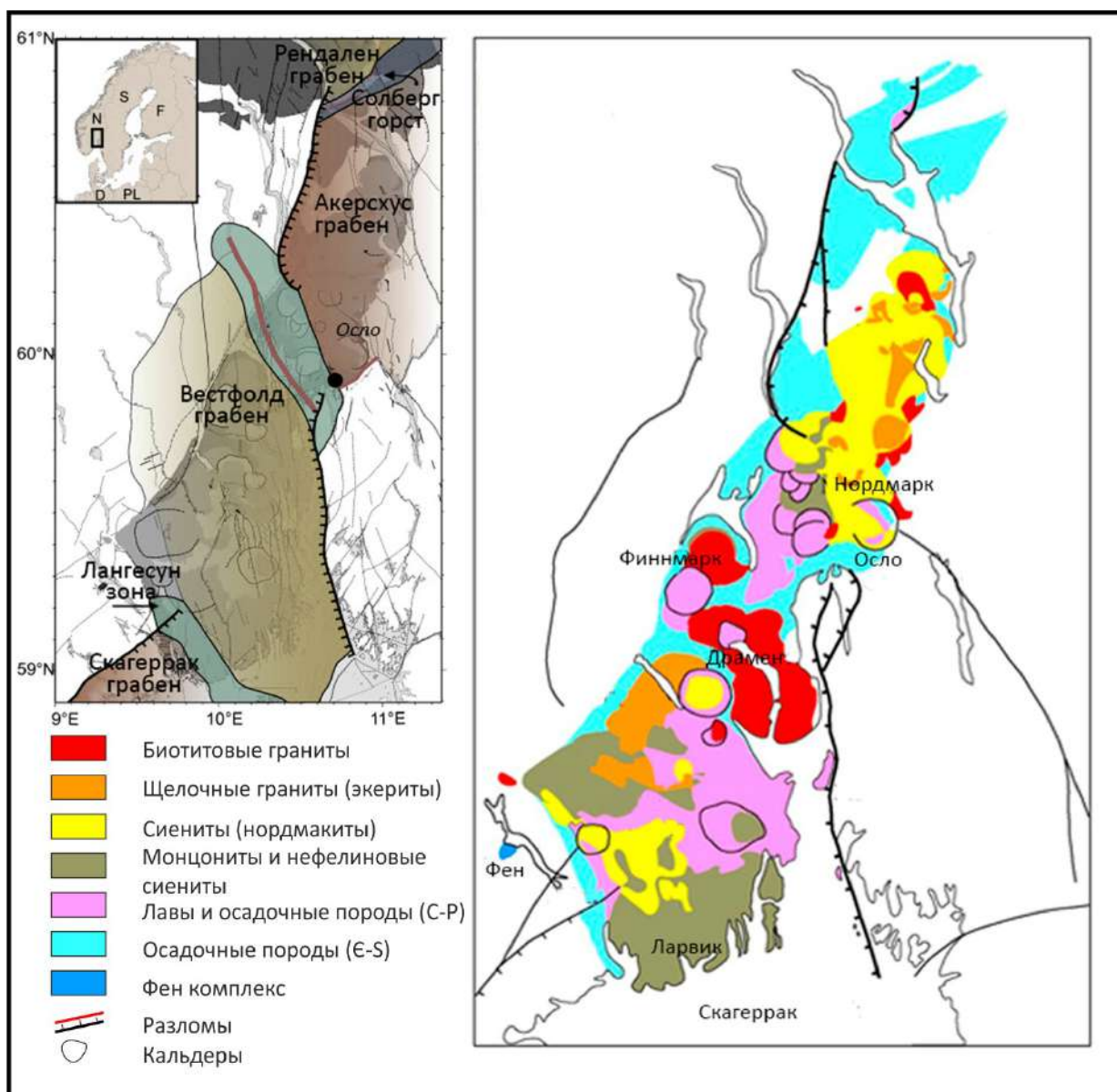


Рис. 1.1. Строение рифта Осло (Larsen et al., 2008, с дополнениями)

Таблица 1.1. Тектонические стадии развития рифта Осло

(Larsen et al., 2008)

Стадия	Породы	Возраст Rb/Sr	Возраст U/Pb
1. Предрифтовая	Осадочные породы серии Аскер		< 319 Ma
2. Начальная	Щелочные базальты	304 – 291 Ma	305 – 299 Ma
3. Главная стадия рифтинга	Трахиандезитовые порфиры, интрузии монцонитов и сиенитов	294 – 276 Ma	298 – 292 Ma
4. Центральная	Щелочные граниты (экериты)	280 – 243 Ma	
5, 6. Батолитовая	Монцониты, сиениты, граниты	273 – 241 Ma	

1.2.2 Плутонический комплекс Ларвик

Плутонический комплекс Ларвик располагается между фьордами Осло и Лангесун (рис. 1.2). С геологической точки зрения массив занимает южную часть сегмента Вестфолд. Комплекс составляет 50 км в длину и 20 км в ширину, при этом уровень эрозионного среза оценивается в 1-3 км (Larsen, 2010).

Плутон имеет концентрическую зональность и включает в себя серию кольцеобразных интрузий, различных возрасту и составу: от древних на востоке к молодым на западе (рис. 1.2). Магматический центр интрузии с течением времени перемещался на северо-запад, при этом состав пород изменялся от кислого умеренно-щелочного до основного щелочного (Larsen, 2010).

В пределах плутонического комплекса Ларвик наиболее распространены ларвикиты (рис. 1.3). Это местное название породы, которое происходит от города Ларвик. Согласно классификации магматических пород по петрографическому кодексу ларвикит следует считать разновидностью монцонита, монцодиорита или сиенита, в зависимости от химического состава (Larsen, 2010, Жданов и др.).

Главными породообразующими минералами являются К-На полевые шпаты, также могут присутствовать авгит, эгирин, биотит, нефелин или кварц. Цвет породы от светло- до темно-серого, структура массивная. Среди удлиненных кристаллов полевого шпата заметны темноцветные минералы, количество которых значительно меньше.

В полированном срезе камня в полевых шпатах наблюдается эффект Шиллера — оптическое явление, которое проявляется в свечении кристаллов при попадании на них света под определенным углом. Именно это свойство придало ларвикиту всемирную известность как декоративному камню. Его можно встретить в отделке зданий во многих городах Норвегии, а также в других странах. Так, например, в Санкт-Петербурге ларвикитовые филенки украшают фасад Дома книги на Невском проспекте (Булах и др., 2013). Добыча этого камня ведется с 1800-х годов, и на сегодняшний день разра-

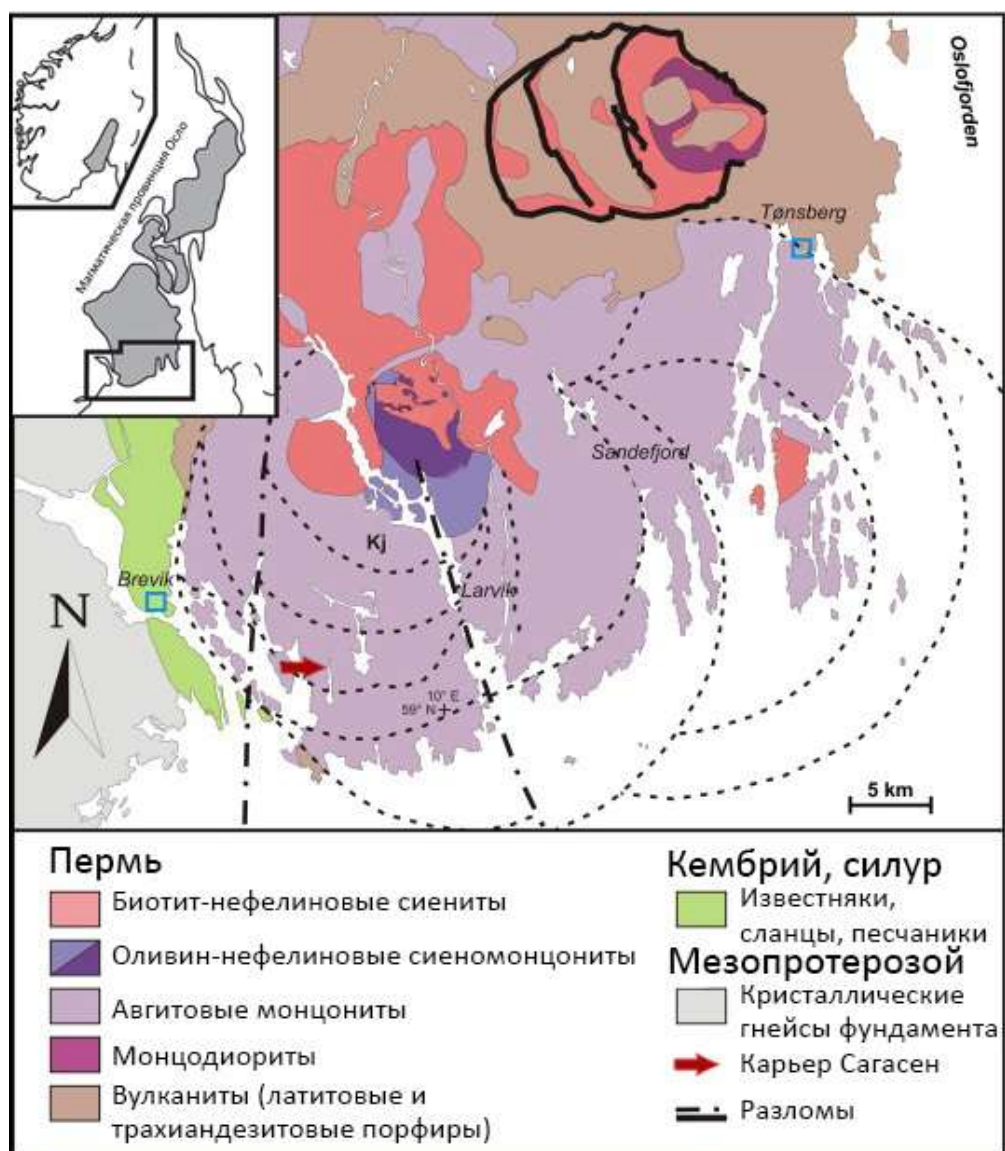


Рис. 1.2. Строение plutонического комплекса Ларвик (Larsen, 2010)

батываются 30 карьеров (Larsen, 2010). С точки зрения экономической целесообразности добычи представляют интерес однородные породные блоки без трещин, полевой шпат в которых обладает хорошо выраженным эффектом Шиллера (Heldal et al., 2008, Andersen et al., 2008).

Помимо ларвикитов, встречаются лардалиты, фойяиты и нефелиновые сиениты. (Larsen, 2010). Руководствуясь петрографическим кодексом (Жданов et al., 2009), фойялитом нужно называть породы, в которых содержание калиевого полевого шпата и плагиоклаза примерно равны, при этом содержание нефелина больше чем лейцита. Лардалит — местное название крупнозернистого богатого нефелином ларвикита (согласно петрографическому кодексу - нефелиновый сиенит). На первый взгляд внешне породы схожи между собой, однако в лардолите присутствуют нефелин, содержание которого может достигать до 30%; кристаллы полевых шпатов достигают больших размеров и имеют ромбовидную форму. Среди темноцветных минералов встречаются оливин, кли-

нопироксен, а в качестве аксессуарных — магнетит, апатит, циркон и другие (Larsen, 2010).

Между секторами кольцевых интрузий присутствуют текстурные отличия. Темно-цветные минералы образуют полосы. В каждом кольцевом секторе имеются внутренние слои. Это говорит о том, что, вероятно, кристаллизация контролируется локальными факторами, в отличие от глобального гравитационного расслоения в больших плутонах (Piilonen et al., 2012). Наиболее ранние интрузии в плутоническом комплексе насыщены кремнеземом и являются миаскитовыми по составу. Породы представлены монцонитами и монцосиенитами (рис. 1.2, секторы 1, 2). Молодые интрузии, расположенные на западе, имеют апатитовый состав. В секторах 3 — 5 (рис. 1.2) породы немного недосыщенные кремнеземом, в секторе 6 — сильно недосыщенные (Piilonen et al., 2012).

Батолит Ларвик прорывает силурийские и каменноугольные осадочные породы и базальтовые лавы. Возраст базальтовых лав был оценен по перовскиту U-Pb методом в 301 млн лет (Larsen, 2010). На северо-западе серия кольцевых интрузий прорывается нефелиновыми и щелочными сиенитами, возраст которых 298.6 млн лет (определен U-Pb методом по бадделеиту) (Larsen, 2010). Таким образом, формирование плутона занимает 4-6 млн лет (Larsen, 2010).



Рис. 1.3. Ларвикит

1.2.3 Пегматиты карьера Сагасен и другие пегматиты комплекса

Общая характеристика

Во всех частях плутонического комплекса Ларвик распространены щелочные пегматиты. Кроме того, они встречаются в виде интрузий в гнейсах, нефелинитах и базальтах на западе в Лангесундфьорде и Порсгрунне. Пегматиты характеризуются большим разнообразием текстур, морфологии и минералогического состава (Piilonen et al., 2012). Так же как и вмещающие породы, пегматиты демонстрируют эволюцию магм от миаскитовых и кварцсодержащих на востоке до агпаитовых и нефелинсодержащих на западе и северо-западе комплекса. На основании минералов-индикторов выделяют

миаскитовые и агпайтовые пегматиты (Khomyakov, 1995; Piilonen et al., 2012). Более подробная классификация, предложенная Ларсеном (Larsen, 2010), также основана на минеральных индикаторах. Согласно этому делению, в плутоническом комплексе Ларвик присутствуют шесть главных типов пегматитов: (1) Ставерн (S) в восточной части; (2) Столакир (ST); (3) Тведален (Т) в центральных частях комплекса; (4) Лангесунфьорд (L) — тип, обнаруженный преимущественно западной части одноименного фьорда; (5) Браттеген (В) — характерный только для северо-западных интрузий; (6) внешние (EX) пегматиты (Piilonen et al., 2013). Пегматиты карьера Сагасен относятся к типу Тведален (Т).

Плутонический комплекс Ларвик содержит около тысячи пегматитовых тел (Larsen, 2010). Их форма различна, но чаще встречаются дайки (рис. 1.5). Присутствуют пегматитовые тела, которые достигают огромных размеров и имеют ответвления. Некоторые пегматиты были вскрыты при разработке карьеров, но только часть из них характеризуются уникальным минералогическим разнообразием.



Рис. 1.4. Пегматит с нефелином, микроклином и эгирином



Рис. 1.5. Разнонаправленные пегматитовые дайки в монцоните (ларвиките)

Генезис

Пегматиты формировались на поздней стадии магматической эволюции плутона, в тот момент, когда щелочные магмы были обогащены редкими землями и такими элементами как Th, Zr, Nb, Be. Образование пегматитов, вероятно, происходило во время кристаллизации миаскитов и нефелиновых сиенитов, однако источник вещества не всегда был связан с вмещающими породам. Некоторые пегматиты имеют своеобразную минерализацию, которая говорит о поступлении другого вещества.

Петрогенез различных типов пегматитов еще недостаточно изучен (Larsen, 2010). Ряд работ посвящен петрологии нефелиновых сиенитов. Были охарактеризованы условия формирования циркониевых минералов, изменение в составе расплава в ходе их кристаллизации, а также роль летучих компонентов (Andersen et al., 2010). Одним из последних исследований, посвященному генезису пегматитов, является работа Sunde

et al. (2018). На основании характера распределения редкоземельных элементов в вёлерите из пегматитов и во вмещающих породах (монцонитах и нефелиновых сиенитах) авторами было показано, что пегматиты имеют общее происхождение с вмещающими породами, несмотря на существенные различия в минеральном составе (Sunde et al., 2018).

Минеральный состав

Минералогия пегматитов очень разнообразна. Основную массу породы составляют щелочные полевые шпаты, нефелин, содалит, авгит, биотит, щелочные амфиболы и пироксены. Из рудных минералов встречается магнетит, молибденит, сфалерит и другие сульфиды. Акцессорные фазы очень разнообразны. Велико количество минералов редких земель. Обнаружены такие минеральные виды, как бастнезит, церит, кайнозит. Поздние стадии гидротермальных процессов связаны с образованием циркона, цеолитов, флюорита, кальцита, а также с кристаллизацией бериллиевых и редкоземельных минералов. Характерными являются минералы группы вёлерита (рис. 4.35, 5.9) (Piilonen et al., 2013).

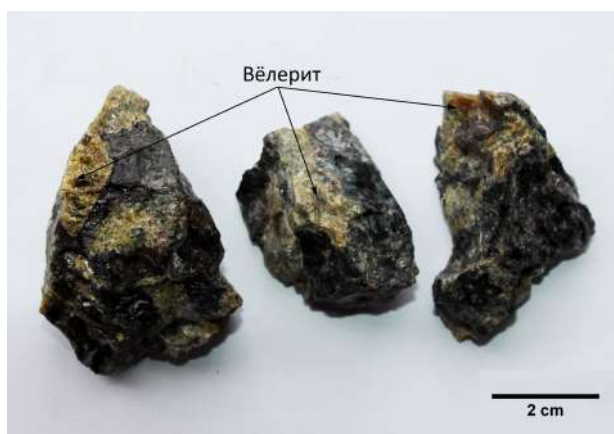


Рис. 1.6. Кристаллы вёлерита

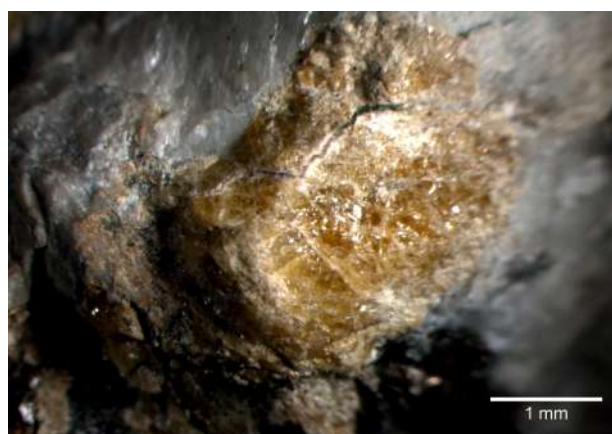


Рис. 1.7. Вёлерит в полевом шпате

В породах plutonic complex Ларвик неоднократно обнаруживались новые минеральные виды, в том числе и в последнее время. Только в 2017 году было опубликовано два исследования о новых минералах. В нефелиновых пегматитах на карьере Сага I был обнаружен новый бериллиевый силикат гидроксилгугианит (hydroxylgugiaite) из группы мелилита (Grice et al., 2017). Впервые были изучены состав и структура хансэсмаркита (hansesmarkite), который также был открыт в нефелиновых сиенитах (Friis et al., 2017). Список минералов, впервые обнаруженных в plutonic complex Ларвик приведен в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Минералы, впервые описанные в плутоническом комплексе Ларвик (Müller et al., 2017)

Название	Формула	Ссылка
Алфарсенитит	$NaCa_2Be_3Si_4O_{13}(OH)_2 \cdot H_2O$	Raade et al., 2009
Астрофиллит	$K_2Na_2Fe_7Ti_2(Si_4O_{12})O_2(OH)_4F$	Scheerer, 1854
Велерит	$NaCa_2(Zr, Nb)(Si_2O_7)(O, F)_2$	Scheerer, 1843
Гадолинит-(Ce)	$Ce_2FeBe_2(SiO_4)O_2$	Segalstad and Larsen, 1978b
Гренмарит	$Na_4MnZr_3(Si_2O_7)_2O_2F_2$	Bellezza et al., 2004
Гамбергит	$Be_2(BO_3)(OH)$	Segalstad and Larsen, 1978a
Гансесмаркит	$Ca_2Mn_2Nb_6O_{19} \cdot 20H_2O$	Friis et al., 2017
Гомилит	$Ca_2FeB_2(SiO_4)_2O_2$	Pajkull, 1876
Гидроксилугуианит	$(Ca_3Al)R_4(Si_{3.5}Be_{2.5})R_6O_{11}(OH)_3$	Larsen et al., 2010
Йотдалит I	$(Na, Ca)_2Ca_4Zr(Mn, Ti, Fe)(Si_2O_7)_2(F, O)_4$	Brøgger, 1890
Капшеленит-(Y)	$BaY_6B_6Si_3O_{24})F$	Brøgger, 1884
Катаплеит	$Na_2ZrSi_3O_9 \cdot H_2O$	Weibye, 1850
Кьявеннит	$CaMnBe_2Si_5O_{13}(OH)_2 \cdot 2H_2O$	Raade et al., 1983
Лейкофанит	$NaCaBeSi_2O_6F$	Erdmann, 1840
Лавенит	$(Na, Ca)_2(Mn, Fe^{2+})(Zr, Ti, Nb)(Si_2O_7)(O, OH, F)_2$	Brøgger, 1884
Меланоцерит	$(Ce, Ca)_5(SiO_4, BO_4)_3(OH, F)$	Brøgger, 1887a
Мозандрит-(Ce)	$(Ca, Ce)_4(\square, Ca, Na)_3Ti(Si_2O_7)_2(H_2O, OH, F)_4H_2O$	Erdmann, 1840
Норденшельдин	$CaSn(BO_3)_2$	Brøgger, 1890
Питерандерсенит	$Mn_4Nb_6O_{19} \cdot 14H_2O$	Friis et al., 2014
Пирохлор	$(Ca, Na)_2Nb_2O_6(F, OH)$	Wöhler, 1826
Розенбушит	$Na_2(Na, Ca)_4Ca_6Zr_3Ti(Si_2O_7)_4O_4F_4$	Brøgger, 1887b
Сфенбергит	$Ca(Fe_6^{2+}Fe^{3+})Ti_2(Si_4O_{12})_2O_2(OH)_5(H_2O)_4$	Khomyakov et al., 2011
Торит	$ThSiO_4$	Berzelius, 1829
Тритомит-(Ce)	$Ce_5(SiO_4, BO_4)_3(OH, O)$	Weibye, 1850
Тведалит	$Ca_4Be_3Si_6O_{17}(OH)_4 \cdot 3H_2O$	Larsen, 1992
Феррикьявеннит	$Ca_{1-2}FeSi_5Be_2O_{13}(OH)_2 \cdot 2H_2O$	Grice et al., 2013

Эйрикит	$KNa_6(Be_2(Si_{15}Al_3)O_{39}F_2]$	Larsen et al., 2010
Эвдидимит	$Na_2Be_2Si_6O_{15} \cdot H_2O$	Brøgger, 1887c
Эгирин	$NaFe(Si_2O_6)$	Berzelius, 1835

1.3 Миаскитовые пегматиты Ильменских гор

Щелочные породы Южного Урала представлены среднеордовикскими миаскитовыми массивами: Ильменогорским (на юге), Вишневогорским (на севере), и соединяющей их центральной щелочной полосой. Вмещающие породы - метаморфические толщи протерозойского возраста. Миаскиты содержат миаскитовые и сиенитовые пегматитовые тела. Объект имеет более чем 200-летнюю историю изучения. Большая часть Ильменогорского массива находится на территории одноименного заповедника. В миаскитовых Ильменских гор впервые описаны такие минералы, как ильменит, канкринит, эпинит (Попов и Попова, 2008). Определение РТ условий проведено термобарометрическим методом – $T = 750 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 3.5 - 2.5\text{ кбар}$ (Симанов, 1981). Миаскитовые пегматиты Ильменских гор располагаются в миаскитах и фенитах, а также в метаморфических породах на экзоконтакте массива (Попов и Попова, 2008).

Глава 2

Объекты исследования

2.1 Пегматиты карьера Сагасан

Карьер Сагасен находится в центральной части plutонического комплекса Ларвик. Пегматитовое тело представляет собой дайку, падающую под углом 10° на юго-восток. Мощность в среднем составляет 2.5 м, при этом в юго-восточном направлении дайка постепенно сужается. Вмещающими породами служат авгитовые монцониты. Между монцонитами и пегматитовым телом на всем протяжении дайки прослеживается зона мелкозернистого нефелинового сиенита, мощностью около 20 см (рис. 2.5, табл. 2.1).



Рис. 2.1. Карьер Сагасен и соседние карьеры. Космоснимок (Norgebilder)



Рис. 2.2. Карьер Сагасен (Фото: Артём Кудинов)

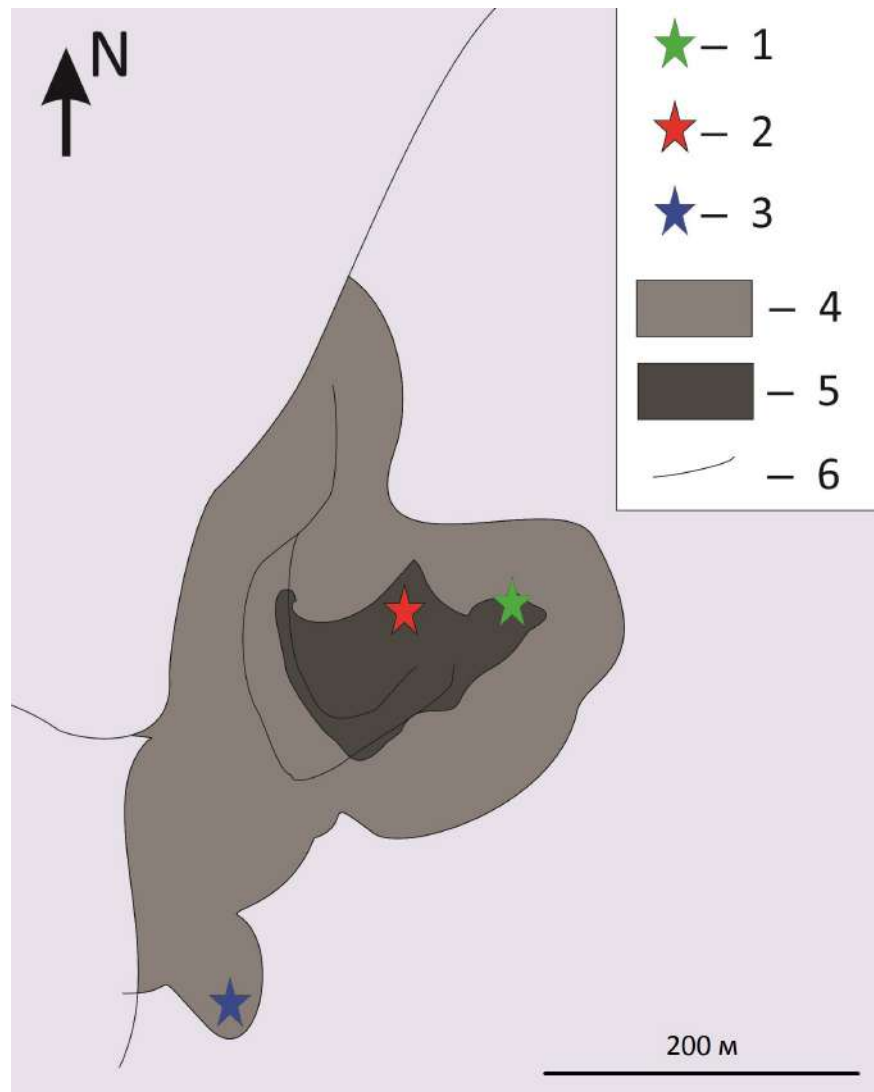


Рис. 2.3. Карьер Сагасен, схема. 1 – горизонтальное пегматитовое тело, 2 – вертикальное пегматитовое тело, 3 – отвал карьера, 4 – разработанный участок карьера, 5 – территория карьера, 6 – дорога

Таблица 2.1. Характеристика пород карьера Сагсен

	Монцонит	Нефелиновый сиенит	Пегматит
Структура	среднезернистая, равномернозернистая	средне-, мелкозернистая, неравномернозернистая	гигантозернистая, неравномернозернистая
Текстура	массивная	массивная, полосчатая	пятнистая
Минеральный состав	К-Na полевой шпат, пироксен, амфибол, магнетит	нефелин, микроклин, биотит	нефелин, микроклин, альбит, биотит, щелочной амфибол и пироксен, вёлерит, циркон, пироклор, содалит



Рис. 2.4. Пегматитовая дайка (Фото: Knut Edvard Larsen)



Рис. 2.5. Пегматитовая дайка: I — монзонит, II — нефелиновый сиенит, III — пегматит (Фото: Артём Кудинов)

Образцы пегматитов были отобраны в ходе учебной геологической практики в Южной Норвегии, которая проходила в августе 2017 года. Коллекция была существенно расширена в ходе специальной минералогической практики в 2018 году. В 2017 году были отобраны образцы из горизонтального пегматитового тела, а также из отвала карьера. В 2018 году горизонтальная пегматитовая дайка оказалось затопленной. Образцы отбирались из отвала карьера, и из вертикального пегматитового тела. Для исследования было выбрано 9 образцов (рис. 4.1 — 4.9). При этом три образца (рис. 4.1, 4.50, 4.5) отобраны из горизонтальной пегматитовой дайки, а остальные из отвала карьера. Выбор образцов для исследования проводился на основании их минерального состава. Для определения температурных условий предполагалось использовать полевые шпаты и нефелин, при этом эти минералы не были преобразованы вторичными процессами. Использовались кристаллы из образца L1, L4, L10. Кроме того, представляло интерес минеральное разнообразие пегматитов. В дальнейшем образцы были распилены на несколько частей: L-01-1, L-04-1, L-06-1, L-07-1, L-07-2, L-10-1, L-10-2. Из них было изготовлено 7 шайб, диаметром 1 дюйм (2,54 см). Из образцов отобранных в 2018 году было изготовлено 10 шлифов на эпоксидной смоле. В настоящей работе использовались только 4 из них — 12-S-N18, 14-S-N18, 22-S-N18, 43-S2-N18.

2.2 Миаскитовые пегматиты Ильменских гор

Для сравнения были выбраны пегматиты Ильменских гор, Южный Урал. На территории заповедника заложены многочисленные копи. Образцы были отобраны в ходе производственной практики в Южно-Уральском научном центре в 2018 году.

Отбор образцов проводился на №7 и №179 коях. На копи № 7 обнажается система

разнонаправленных пегматитовых жил. Вмещающими породами служат миаскиты с гнейсовидной текстурой, контакты пегматитов нечеткие (рис. 4.47). Центральная зона сложена миаскитовым пегматитом, на периферии содержание нефелина снижается, вплоть до образования полевошпатового и биотит-полевошпатового пегматита. Структура гиганто- и крупнозернистая; главные минералы - нефелин, полевые шпаты, биотит, ильменит. Копь № 179 вскрывает жилу сиенитового (с зоной миаскитового) пегматита, расположенную в кварцитах.

Было отобрано 4 образца, из которых изготовлено 4 шайбы.

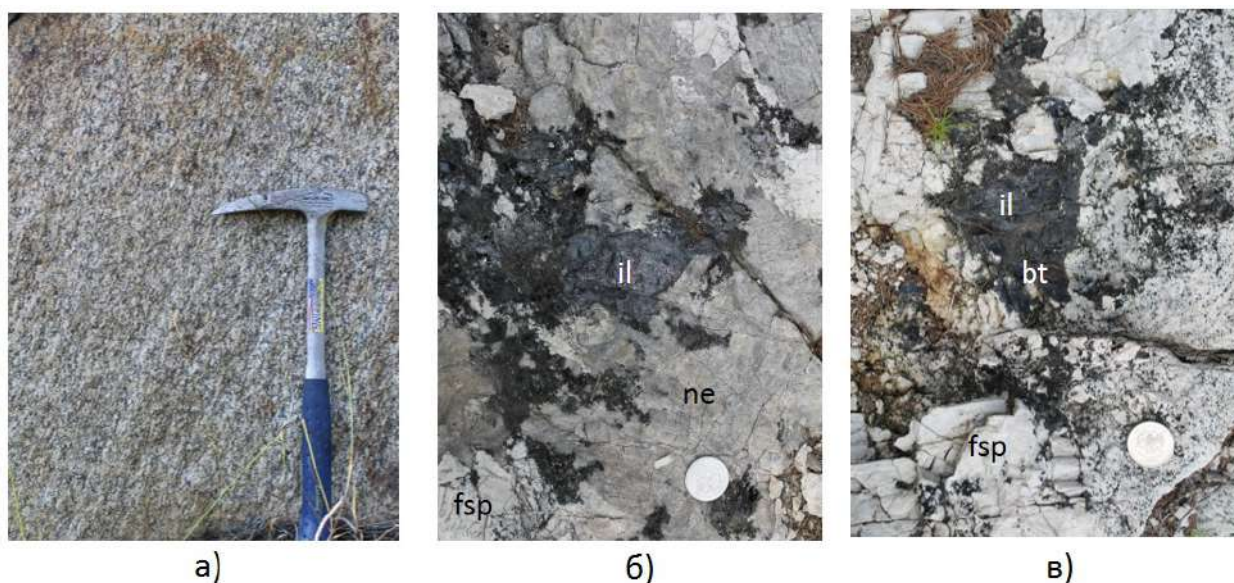


Рис. 2.6. Породы Ильменогорского массива: а) миаскит, б, в) миаскитовый пегматит

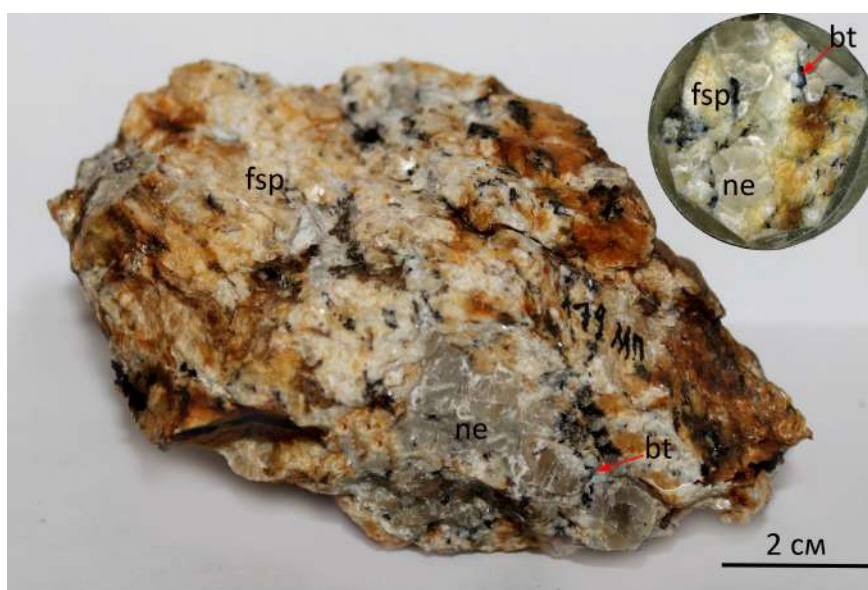


Рис. 2.7. Образец миаскитового пегматита Ильменских гор. Копь №179

Глава 3

Методы исследования

Исследование образцов пегматитов проводилось комплексом методов.

3.1 Оптическая микроскопия

На начальном этапе работы шлифы и шайбы изучались на микроскопе Leica DM 2500P с цветной цифровой фотокамерой Leica DFC 295 на кафедре минералогии СПбГУ.

3.2 Порошковая рентгенография

Для рентгенографического исследования образцов с помощью алмазного бура был отобран порошок различных визуально минеральных фаз. По возможности проводился отбор мономинеральных образцов.

Съемка производилась на приборах ресурсного центра СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» MiniFlex II(Cu $k\alpha$, Co $k\alpha$) при напряжении 30 kV и силе тока 15 mA. Прибор с кобальтовым анодом использовался для съемки образцов, в которых предполагалось большое содержание железа. Съемка производилась со скоростью 2 °/мин., шаг съемки 0,02 °. Также были заданы пределы сканирования 5 — 80 °. Для распознавания дифрагированных волн использовался мультicanaльный детектор D/teX Ultra. Для обработки данных использовалась программа PDXl.

3.2.1 Определение параметров элементарной ячейки методом Ритвельда

Отобранные образцы полевых шпатов были дополнительно исследованы методом рентгенофазового анализа для определения параметров элементарной ячейки и на основании этого степени упорядоченности в них Al.

Для исследования были использованы полевые шпаты из образцов L-1-1, L-10-2, L-04-1. Съемка проводилась в ресурсном центре (РЦ) Научного парка СПбГУ «Рентгеноконтрастные методы» на приборе Ultima IV. Параметры элементарной ячейки рассчитывались методом Ритвельда в программе Тораз.

3.3 Электронная микроскопия и электронно-зондовый микроанализ

Электронная микроскопия и электронно-зондовый микроанализ проводились в РЦ СПбГУ «Центр микроскопии и микроанализа» на настольном растровом электронном

микроскопе- микроанализаторе Hitachi TM 3000 (аналитики — к.г.-м.н. Янсон С. Ю., Бенкен К. А.); в РЦ СПбГУ «Геомодель» с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N с аналитической приставкой количественного энерго-дисперсионного микроанализа EDX - AzTec Energy 350 (аналитики — к.х.н. Шиловских В. В., Власенко Н. С.).

3.4 Рамановская спектроскопия

Рамановская спектроскопия проводилась в ресурсном центре (РЦ) СПбГУ «Геомодель» на рамановском спектрометре Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800 (Аналитик — Бочаров В. Н.)

Использовались: лазер Ar+ с перестраиваемыми длинами волн от 457 до 514 нм с набором фильтров для работы на 488 нм и 514 нм, мощностью до 50 mW, микроскоп Olympus BX41 — объективы 10x (NA 0,25), 50x (NA 0,75), 50x (NA 0,5), 100x (NA 0,9), 40x-nuv, ARO 15x, ATR 36x. Спектрометр оснащен детектором — CCD и камерой 1024x256 пикселей.

3.5 Определение термодинамических параметров по химическому составу минералов, их свойствам и ассоциациям (минеральные геотермометры)

3.5.1 Полевые шпаты: микроклин, альбит

Каркас структуры всех полевых шпатов состоит из четырехчленных колец $[TO_4]$ тетраэдров, где T — Al, Si. Кольца располагаются примерно параллельно плоскости $(0\bar{1}0)$. Важной характеристикой для таких минералов помимо химического состава является особенность распределения Al-Si в кремнекислородных тетраэдрах, которое зависит от условий кристаллизации индивида. При высоких температурах наблюдается статистическое распределение Si-Al в тетраэдрах, а следовательно, более высокая симметрия кристаллов, при низких — упорядоченное и более низкая симметрия. Высокотемпературная модификация $K[AlSi_3O_8]$ — санидин (а также и ортоклаз) кристаллизуется в моноклинной сингонии (пространственная группа — $C2/m$), в микроклине симметрия понижается до триклинной (пространственная группа — $C\bar{1}$) (Каменцев и Сметанникова, 1984).

Определения степени упорядоченности Al производилось по методу Д. Стюарта и Т. Риббе (Stewart and Ribbe, 1969). Метод основан на изменении параметров элементарной ячейки от степени упорядоченности Al в кремнекислородных тетраэдрах. Вдоль оси располагается цепочка трех кремнекислородных тетраэдров — T_1O , T_2m , T_1m , вдоль оси b — шесть кремнекислородных тетраэдров — T_2m , T_1O , T_2m , T_2O , T_1m , T_2O . В упорядоченных щелочных полевых шпатах весь Al концентрируется в тетраэдре T_1O ,

содержание Al вдоль оси c равно 1. В неупорядоченных разновидностях количество Al равно 0,75, так на каждый тетраэдр в среднем приходится 0,25. Вдоль b содержание Al для упорядоченных равно 1, а для неупорядоченных — $0,25 \cdot 6 = 1,5$.

Разница в содержании Al вдоль этого направления 0,5. Зная длину связи $T - O$ для алюминиевого и кремниевого тетраэдра, можно вычислить ожидаемое изменение параметров b и c . При этом параметр a практически не изменяется. При увеличении количества Na также происходит уменьшение параметров элементарной ячейки. Для характеристики упорядоченности и состава неизвестным химическим составом необходимо использовать оба параметра, b и c (Каменцев и Сметанникова, 1984). Температура, при которой альбит становится упорядоченным, варьирует в зависимости от давления. Низкий альбит стабилизируется при $620 - 650$ °C, высокий — при 725 °C, если давление низкое. В калиевом полевошпате симметрия нарушается при температуре 500 °C. Таким образом, санидин стабилен при 1075 до 550 °C, микроклин от 450 до 200 °C. Двойниковая текстура действует как барьер для дальнейшего упорядочения, так как энергия деформации, связанная с различием в параметрах элементарных ячеек, компенсирует уменьшение свободной энергии в результате упорядочения. Упорядочение останавливается не из-за кинетики диффузии Al и Si, а в силу того, что общая движущая сила очень мала или равна нулю. Образование максимально упорядоченного (низкого микроклина) происходит если барьер доменной текстуры преодолевается процессами, связанными с флюидами или внешними напряжениями. В альбите такого барьера нет (Brown and Parsons, 1989, Parsons and Lee, 2005).

Двуполевошпатовый геотермометр основан на зависимости коэффициента распределения натрия (альбитового минала) между сосуществующим калиевым полевым шпатом и плагиоклазом от температуры их кристаллизации (Барт, 1962, Пономарева, 2014). Так отношение мольной доли альбита в K-полевошпате к мольной доле альбита в плагиоклазе связано линейной зависимостью с температурой. И. Д. Рябчиков усовершенствовал метод на основании экспериментальных данных (Рябчиков, 1965). Диаграмма Рябчикова наиболее хорошо подходит для системы, насыщенной кремнеземом в отношении натрия (то есть для плагиоклазов — № 0-30) (Пономарева, 2014). В. В. Гордиенко предложена диаграмма для оценки температуры кристаллизации по содержанию альбитовой составляющей в K-полевошпате (Гордиенко, 1976).

3.5.2 Нефелин

В ходе кристаллизации с понижением температуры происходят изменения химического состава нефелина. В нефелине, находящемся в равновесии с силикатным расплавом, изменяются следующие соотношения:

1. K/Na
2. Si/Al .

В системе $NaAlSiO_4 - KAlSiO_4 - SiO_2 - H_2O$ пределы твердого раствора нефелина соответствуют следующим температурам: 775°, 703° и 509°C. Предполагается, что при постмагматическом охлаждении в системе мигрируют только атомы Na и K. Происходят обменные реакции между полевым шпатом и средой. В результате в нефелине соотношение Na:K приближается к 3:1 (Hamilton, 1961).

Основные факторы, влияющие на окончательный состав нефелина, - это скорость охлаждения вмещающей породы и температура кристаллизации магмы.

Наклон кривых на диаграмме обуславливается тем, что растворимость альбитового минала в твердом растворе нефелина зависит от температуры: чем выше T, тем больше альбита растворяется в натровой части нефелина. Это приводит к смещению изотерм распределения щелочей между нефелином и сосуществующими фазами в сторону нефелинового минала. Повышение кварцевого минала в твердом растворе нефелина приводит к смещению изотерм в натровую область (Hamilton, 1961).

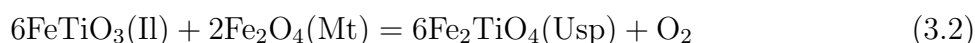
3.5.3 Магнетит — ильменит

Равновесие между магнетитом и ильменитом широко используется для оценки температуры, а также фугитивности кислорода в магматических и метаморфических породах (Sauerzapf et al., 2008, Bowles, 1977). Метод введен Buddington and Lindsley, 1964. Кроме того, авторами была обеспечена первая калибровка, основанная на экспериментальных результатах. Термометр основан на зависимости от температуры процессов обмена $Fe^{2+} + Ti^4$ на Fe^{3+} между титаномангнетитом (твердый раствор магнетита — $FeFe_2O_4$ и ульвошпинели — $FeTi_2O_4$) и ильменитом (твердый раствор гематита — $FeFeO_3$ и ильменита — $FeTiO_3$).



(Sauerzapf et al., 2008)

Оксобарометр (определение фугитивности кислорода) основан на равновесии в окислительно-восстановительной реакции:



(Sauerzapf et al., 2008)

Расчет производился с помощью таблицы Excel (Lepage, 2003), в которой объединены различные методы. Основой для всех методов является расчет следующих параметров:

$$X_{usp} = 3Ti/(Ti + Fe)$$

$$X_{ilm} = 2Ti/(Ti + Fe) \quad X'_{usp} = Ti^{4+}/(Ti^{4+} + Fe^{3+}/2)$$

$$X'_{ilm} = Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+}/2)$$

Из закона действующих масс для реакции 3.1 следует:

$$-\Delta G_r = RT \ln K, \text{ где } K = \frac{a_{ilm} a_{mag}}{a_{hem} a_{usp}} \text{ — константа равновесия реакции}$$

Перепишав уравнение, получим:

$$\frac{a_{ilm}}{a_{mag}} = \frac{a_{usp}}{a_{mag}} \exp\left(-\frac{\Delta G_r^*}{RT}\right)$$

Коэффициенты активности в состоянии равновесия: $a_{ilm} = X_{ilm}$, $a_{hem} = X_{hem}$,

$$X_{ilm} = X_{hem} \frac{a_{usp}}{a_{mag}} \exp\left(-\frac{\Delta G_r^*}{RT}\right)$$

$$X_{ilm} = 1 - X_{hem},$$

$$\frac{1}{X_{hem}} = \frac{a_{usp}}{a_{mag}} \exp\left(-\frac{\Delta G_r^*}{RT}\right) + 1$$

Для термометрии использовалось уравнение:

$$X'_{ilm} = f(T, X'_{usp}) = 1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{K_1}{T+K_2+\frac{K_3}{T^2}}\right) \frac{a_{usp}}{a_{mag}} + 1}, \text{ где}$$

Коэффициенты активности: $a_{usp} = X_{usp} \gamma_{usp}$, $a_{mag} = X_{mag} \gamma_{mag}$

$$RT \ln \gamma_{usp} = X_{mag} (W_{Gusp} - W_{Gmag})$$

$$RT \ln \gamma_{mag} = X_{usp} (W_{Gmag} - W_{Gusp})$$

$$W_{Gusp} = -8872,94, \quad K_1 = 6330,46$$

$$W_{Gmag} = -9131,69, \quad K_2 = 2205242,18$$

(Sauerzapf et al., 2008)

Глава 4

Результаты исследования

4.1 Оптическая микроскопия

Первичная диагностика минералов проводилась на основании их физических свойств: цвета, блеска, спайности, наличию двойников, форме кристаллов.

Образец L1 имеет зональное строение (рис. 4.1). В центральной части присутствуют две зоны меланократовых минералов — эгирина и железистого амфибол, которые "набиты" мелкими кристалликами темноцветной слюды. Внешняя область состоит из светло-серых альбит и микроклина.

Образец L4 состоит из крупных кристаллов зеленого цвета и светло-серого К-полевого шпата; содержит темно-зеленые кристаллы эгирина, а также мелкие чешуйки темно-цветной слюды (рис. 4.50).

Образец L6 имеет пятнистую текстуру, содержит К-полевой шпат, альбит, нефелин, вёлерит, слюду черного цвета, темно-зеленый пироксен (рис. 4.3). Форма выделения вёлерита — зернистые массы медово-желтого цвета, на некоторых участках наблюдаются призматические кристаллы размерами менее миллиметра. Кристаллы слюды — крупные (0,5—2 см), чешуйки имеют гексагональную форму.

Образец L7 слагают преимущественно вторичные минералы — флюорит, биотит, циркон (рис. 4.4). Главным минералом является циркон, кристаллы которого идиоморфные, имеют дипирамидалный габитус.

Образец L10 состоит из К-полевого шпата и альбита, нефелина и вторичных по отношению к нему минералов (рис. 4.5). Структура гигантокристаллическая. Нефелин имеет зональность, которая прослеживается от центра к краю кристалла.

Образец 12-S-N18 (рис. 4.6) содержит крупный (около 10 см) призматический кристалл темно-зеленого пироксена (эгирина), в котором присутствует фенокрист нефелина гексагонального сечения. Основная масса сложена нефелином, сахаровидным альбитом. Вёлерит образует призматические кристаллы (менее 50 мм). В альбите присутствуют коричневый минерал в виде зернистой массы (эвдиалит).

Образец 14-S-N18 (рис. 4.7) состоит из альбита (двух генераций — в сростании с микроклином и сахаровидный), микроклина, нефелина, эгирина, вёлерита, эвдиалита, флюорита.

Образец 22-S-N18 (рис. 4.8) содержит шпреуштейнизированный нефелин, сростания альбита и микроклина, сахаровидный альбит, биотит (аннит). В альбите наблюдаются изометричные кристаллы оранжевого и бурого цвета.

Образец 43-S2-N18 (рис. 4.9) сложен К-полевым шпатом и продуктами его изме-

нения. В качестве включений в полевом шпате присутствуют магнетит и нефелин.

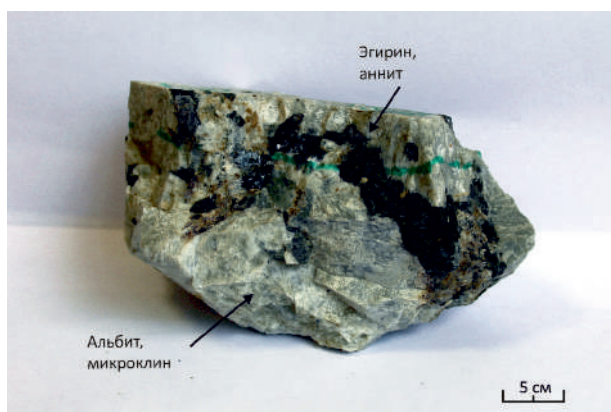


а)

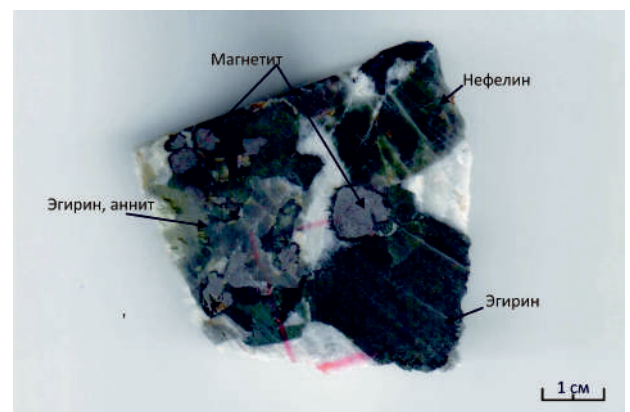


б)

Рис. 4.1. Образец L1: а) крупные идиоморфные кристаллы феррогорнблендита в поле-
вом шпате б) эгирин-аннитовая кайма вокруг кристалла феррогорблендита



а)



б)

Рис. 4.2. Образец L4: а) ксеноморфные кристаллы микроклина с идиоморфным эги-
рином и замещающим его аннитом б) кристаллы магнетита в ассоциации с нефелином и
эгирином

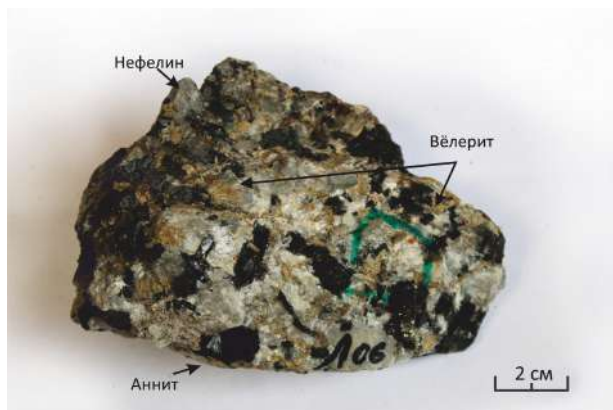


Рис. 4.3. Образец L6. Вёлерит и аннит в полево шпате

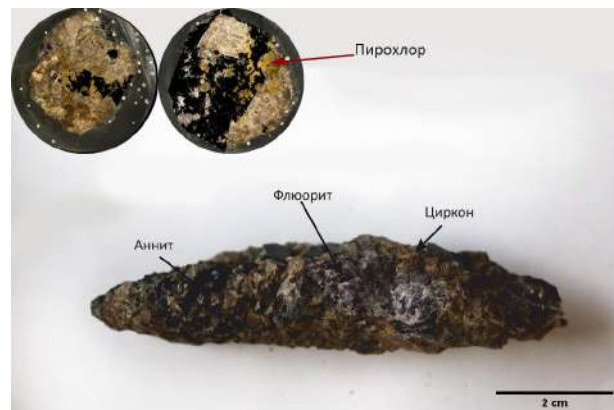
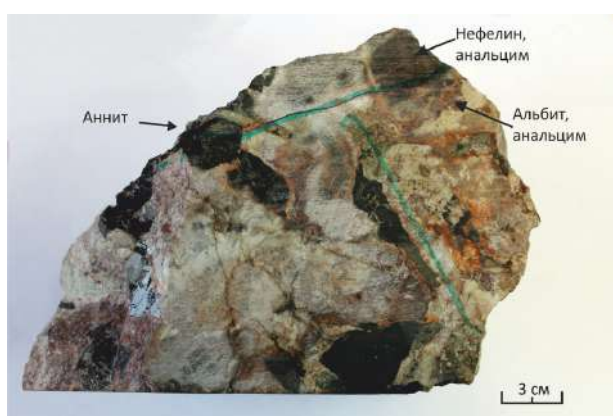


Рис. 4.4. Образец L7 и шайбы. Циркон с аннитом и флюоритом.



а)

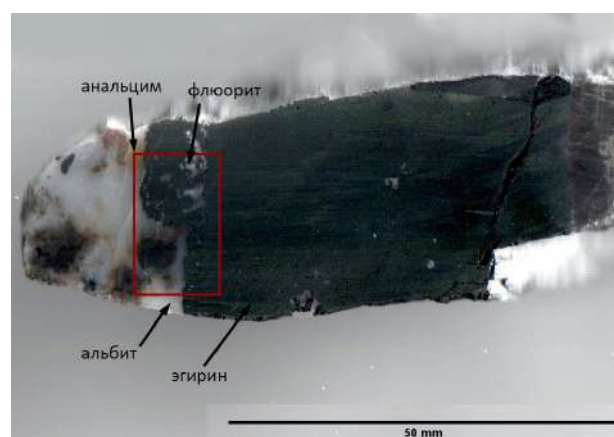


б)

Рис. 4.5. Образец L10: а) нефелин-полевошпатовый пегматит б) кристаллы амфибола и нефелина в пегматите



а)

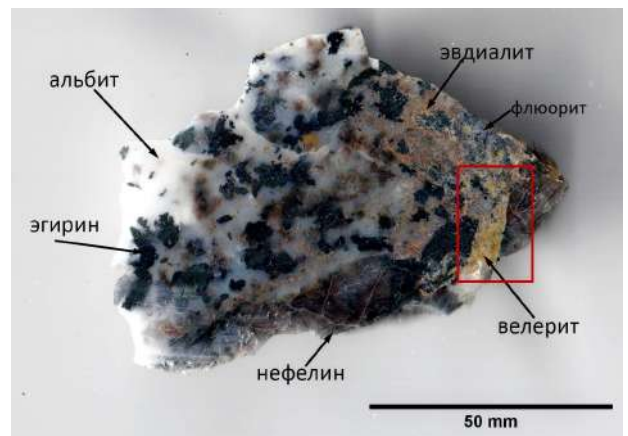


б)

Рис. 4.6. Образец 12-S-N18: а) эгирин в нефелин-полевошпатовой породе б) эгирин в альбите с вторичными изменениями



а)



б)

Рис. 4.7. Образец 14-S-N18: а) нефелин-полевошпатовый пегматит с вёлеритом и эвдиалитом б) кристалл вёлерита в пегматите



а)

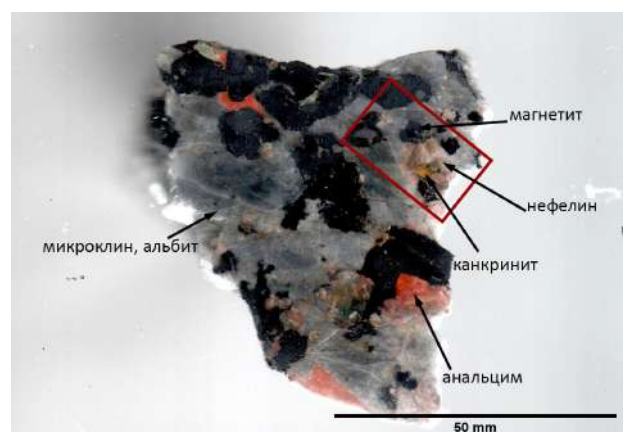


б)

Рис. 4.8. Образец 22-S-N18: а) Полевой шпат с включениями эвдиалита. б) кристаллы измененного нефелина, сахаровидный альбит с включениями



а)



б)

Рис. 4.9. Образец 43-S2-N18: а) нефелин-полевошпатовой пегматит с вторичными минералами б) кристаллы магнетита с эгириновыми каймами в микроклине

С помощью поляризационного микроскопа диагностированы следующие минералы: микроклин, альбит, биотит, нефелин, эгирин, вёлерит, флюорит, циркон, апатит, пирохлор.

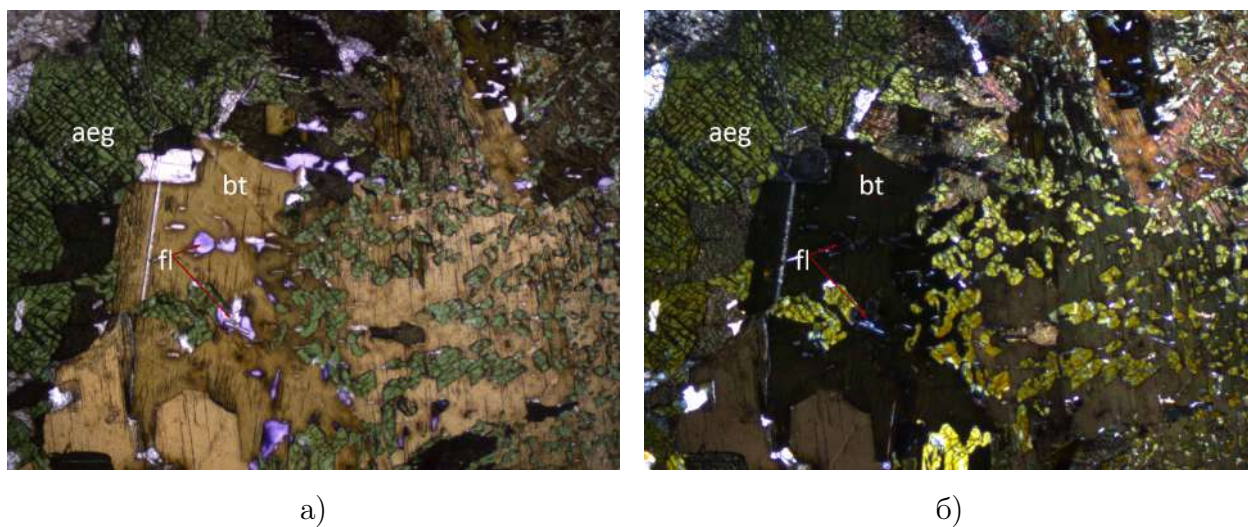


Рис. 4.10. Эгирин (aeg) и биотит (bt) с включениями флюорита (fl) из пегматита (образец 43-S-N18). а) Николи параллельны б) николи скрещенны. Горизонтальный размер кадра – 2 мм

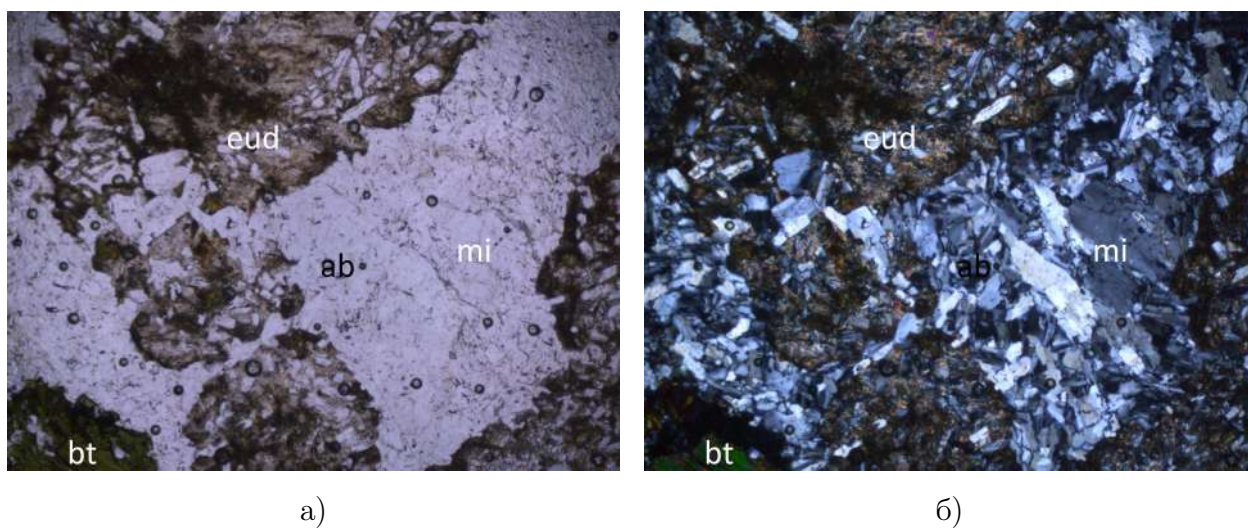
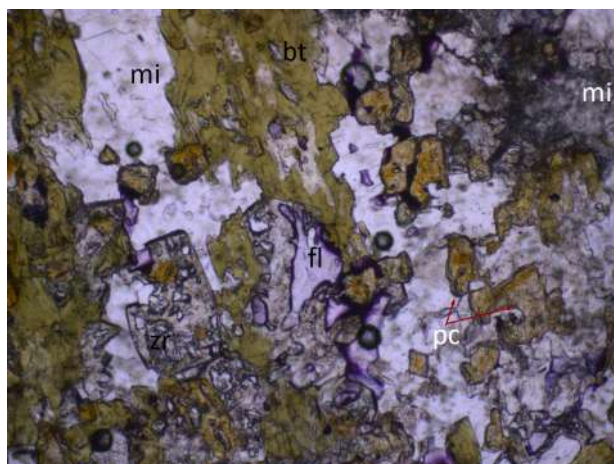
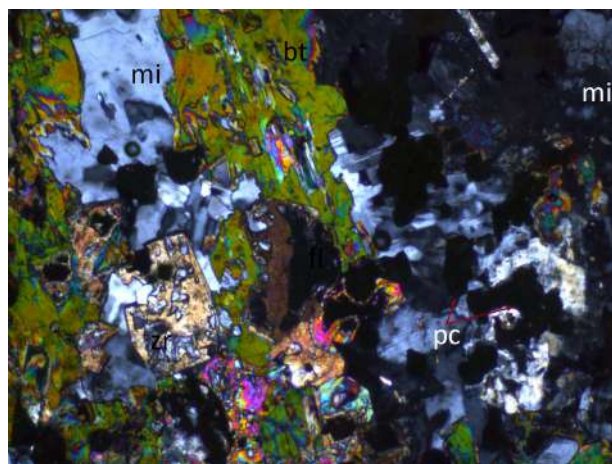


Рис. 4.11. Эвдиалит (eud) в полевошпатовом матриксе: ab – альбит, mi – микроклин, bt – биотит (образец 22-S-N18). а) Николи параллельны б) николи скрещенны. Горизонтальный размер кадра – 2 мм



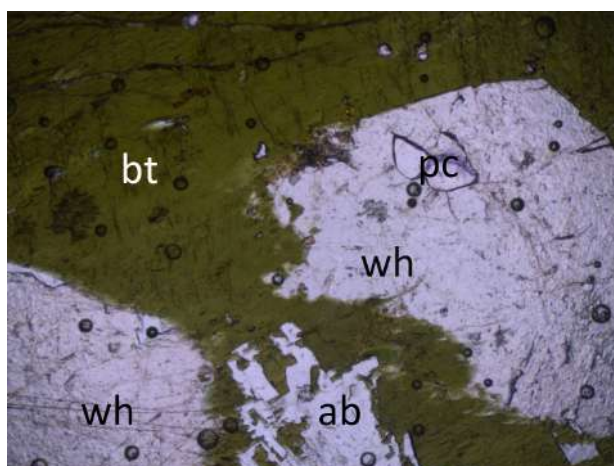
а)



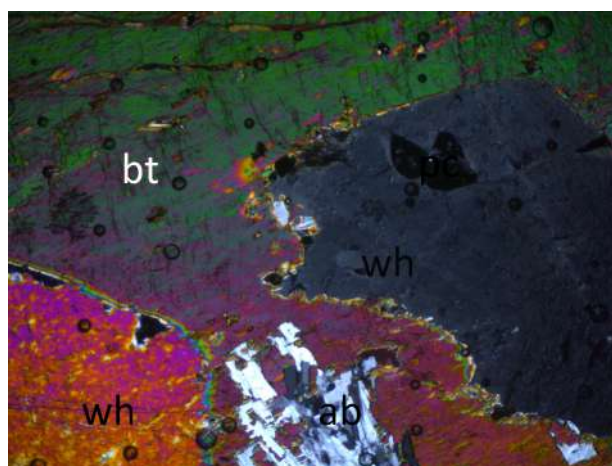
б)

Рис. 4.12. Пойкилокристаллы биотита (bt) и циркона (zr) в микроклине (mi), fl – флюорит, pc – пироклор (образец 14-S-N18). а) николи параллельны

б) Николи скрещенны. Горизонтальный размер кадра – 1 мм



а)



б)

Рис. 4.13. Срастания вёлерита (wh) и биотита (bt), ab – альбит (образец 14-S-N18).

а) Николи параллельны б) николи скрещенны. Горизонтальный размер кадра – 4 мм

4.2 Порошковая рентгенография

Методом рентгенофазового анализа удалось установить следующие минералы: микроклин (рис. 4.14), альбит (рис. 4.14), феррогорнблениит (рис. 4.17), нефелин (рис. 4.16), анальцит (рис. 4.16), содалит (рис. 4.18), канкринит (рис. 4.18), вёлерит (рис. 5.9), эвдиалит (рис. 4.20).

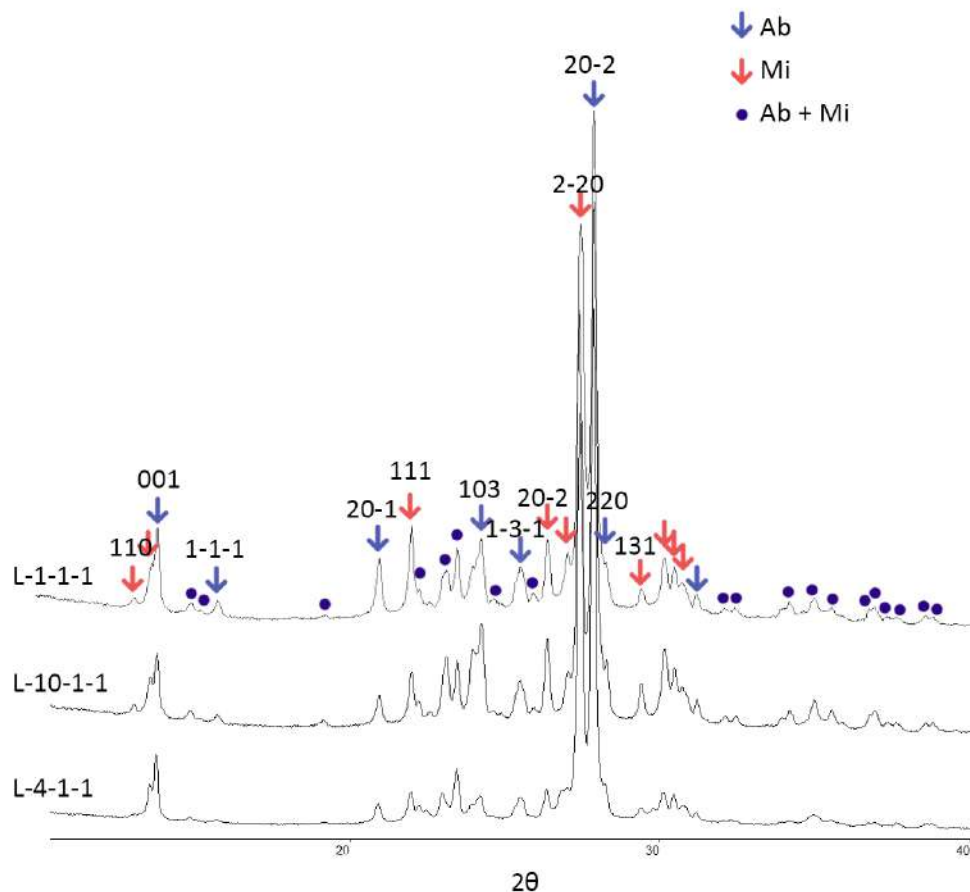


Рис. 4.14. Рентгенограмма полевых шпатов (альбита и микроклина) из образцов L-1, L-10, L-4 (Cu-анод)

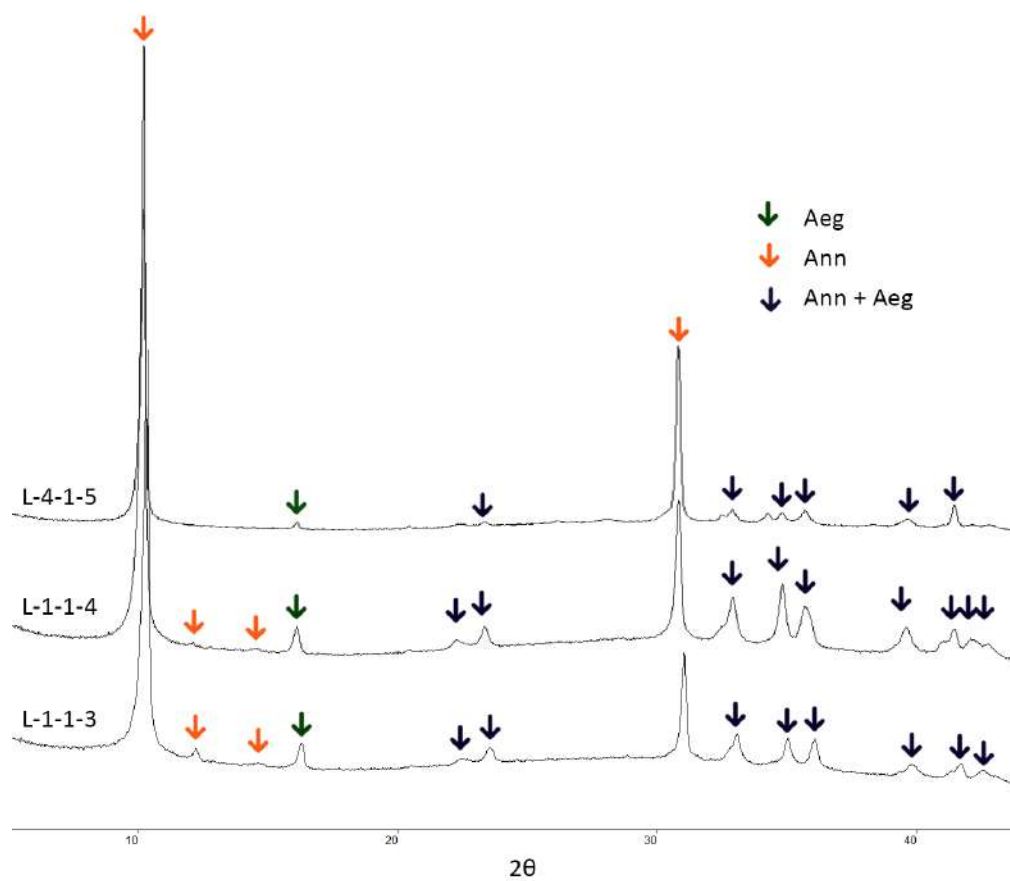


Рис. 4.15. Рентгенограмма эгирина и аннита из образцов L-4, L-1(Co $k\alpha$)

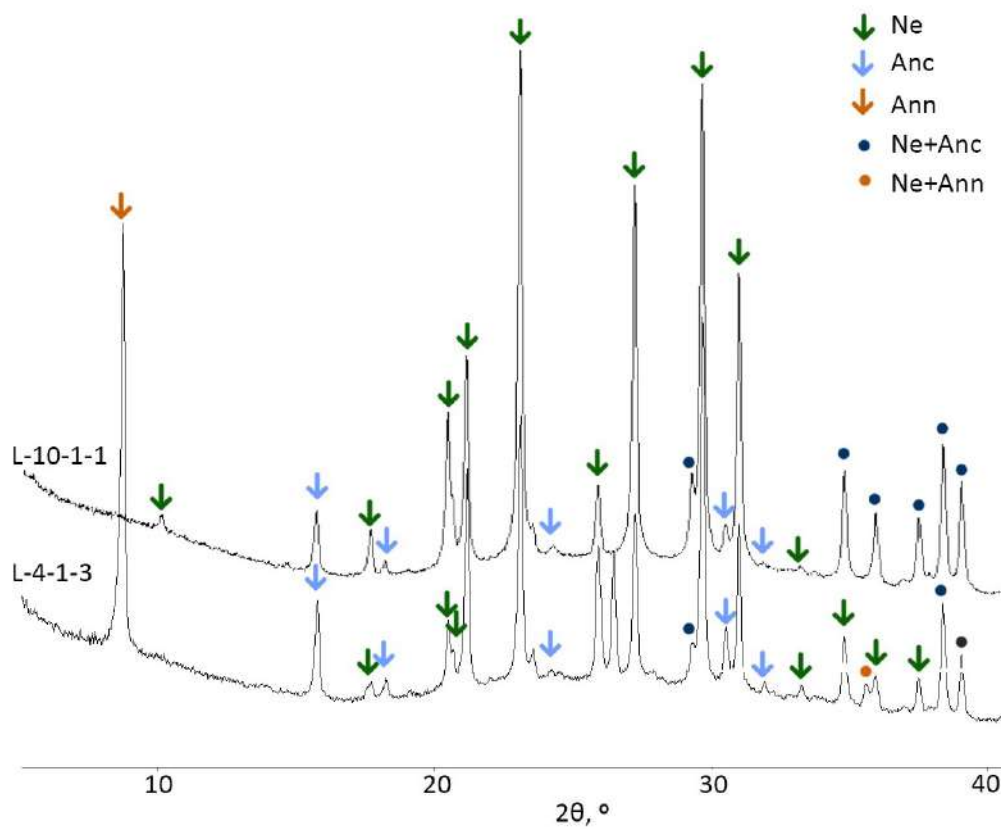


Рис. 4.16. Рентгенограмма нефелина и анальцима из образцов L-4, L-10(Cu $k\alpha$)

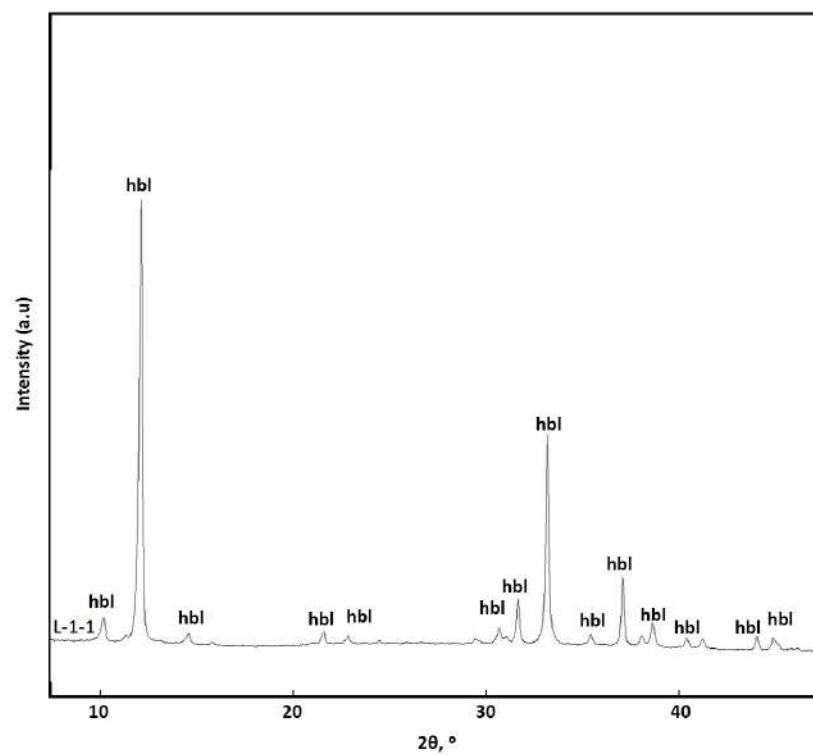


Рис. 4.17. Рентгенограмма феррогорнблендита из образца L-1 ($\text{Co } K\alpha$)

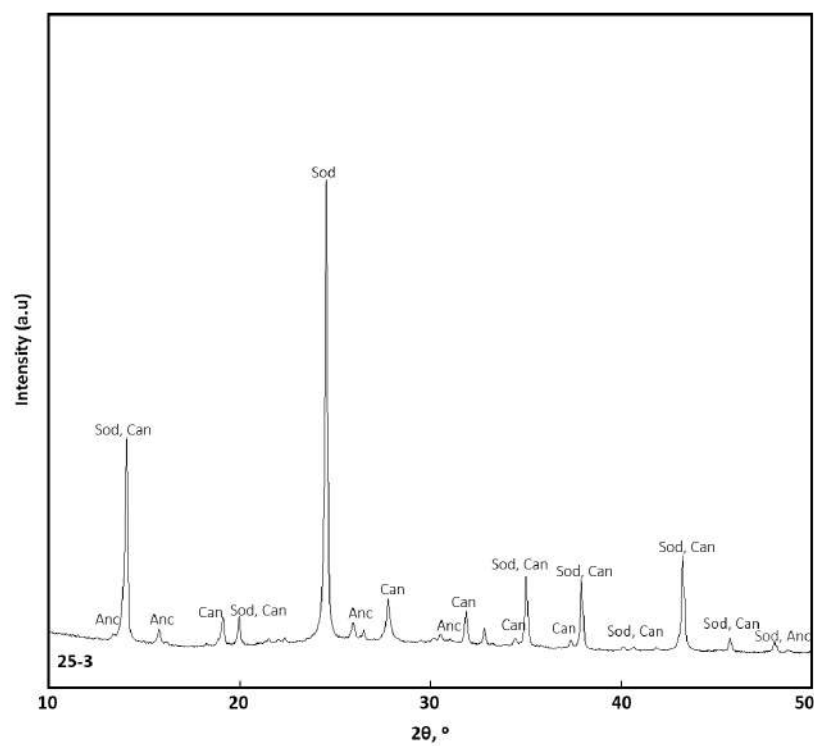


Рис. 4.18. Рентгенограмма содалита и канкринита из образца (Cu-анод)

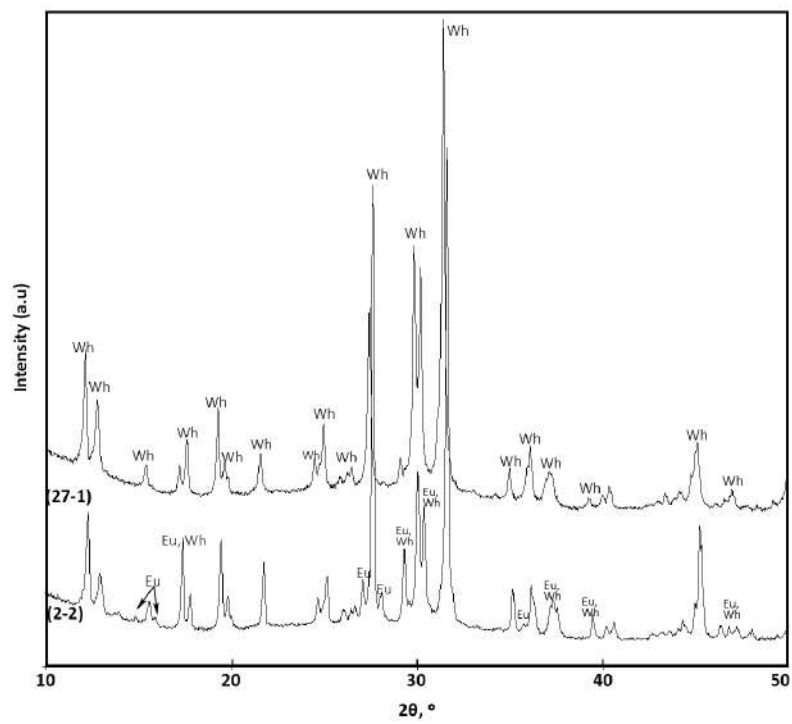


Рис. 4.19. Рентгенограмма велерита и эвдиалита (Cu-анод)

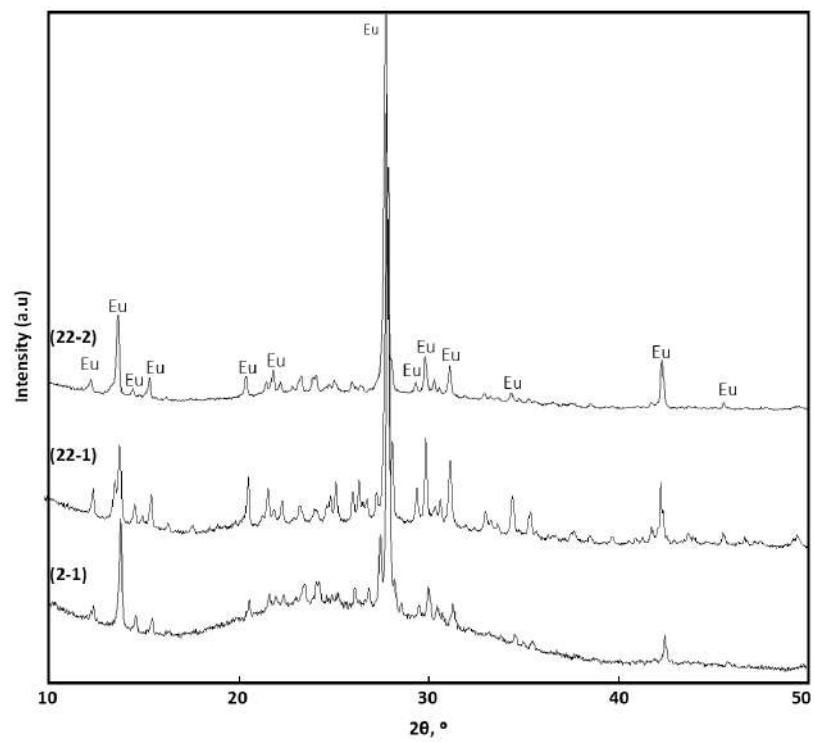


Рис. 4.20. Рентгенограмма эвдиалита (Cu-анод)

4.3 Электронная микроскопия и электронно-зондовый микроанализ

4.3.1 Главные породообразующие минералы

Полевые шпаты

Полевые шпаты представляют собой микроклин и альбит. Кристаллы микроклина ксеноморфны, заполняют промежутки между нефелином, пироксеном и амфиболом. Повсеместно наблюдается замещение микроклина альбитом (рис. 4.21). Кроме того, присутствует мелкозернистый сахаровидный альбит. Характерно развитие вторичных минералов по полевым шпатам: анальцима, натролита.

Нефелин

Нефелин представлен крупными кристаллами, размером до 30 см. На границе с альбитом и вдоль трещин минерал подвержен вторичными замещениями. В магнетите включения нефелина, который имеет кристаллографически правильную форму (рис. 4.25)

Эгирин, аннит

Эгирин представлен идиоморфными призматическими кристаллами. Формы выделения аннита различны — от крупных идиоморфных кристаллов (рис 4.25), размером до 10 см, до ксеноморфных, заполняющих промежутки между полевыми шпатами и нефелином или замещающих высокожелезистые минералы. В образцах L-01-1 и L-10-1 аннит и эгирин представляют собой продукт распада твердого раствора (рис. 4.25, 4.26).

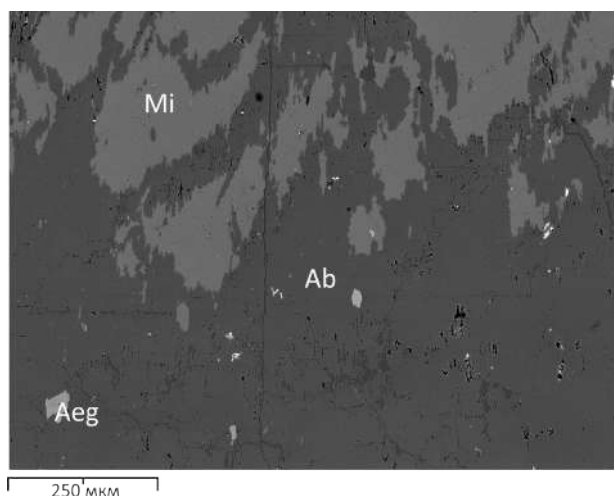


Рис. 4.21. Микроклин и альбит

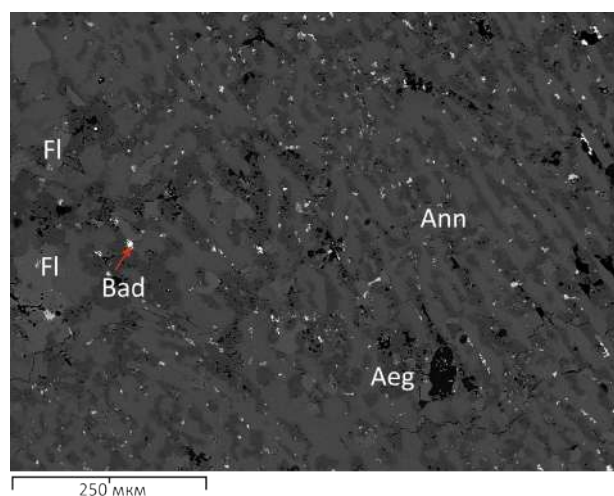


Рис. 4.22. Замещение эгирина аннитом

Магнетит и ильменит

В образце L-04-1 присутствует изометричный кристалл магнетита, размером 1,3 мм. В электронном микроскопе отчетливо наблюдаются структуры распада твердого раствора на железистую и титановую фазу. Кристалл сложен агрегатом полосчатой текстуры, состоящим из двух фаз — магнетита и ильменита, иногда присутствует пирофанит (Mn - аналог ильменита). Ламелли имеют размеры 10-50 мкм в ширину, их взаиморасположение весьма разнообразно, присутствуют паркетные структуры (рис. 4.24).

На границе магнетита и других минералов (полевых шпатов, нефелина) наблюдается переходная зона, сложенная аннитом или анальцимом, на некоторых участках контакт резкий.

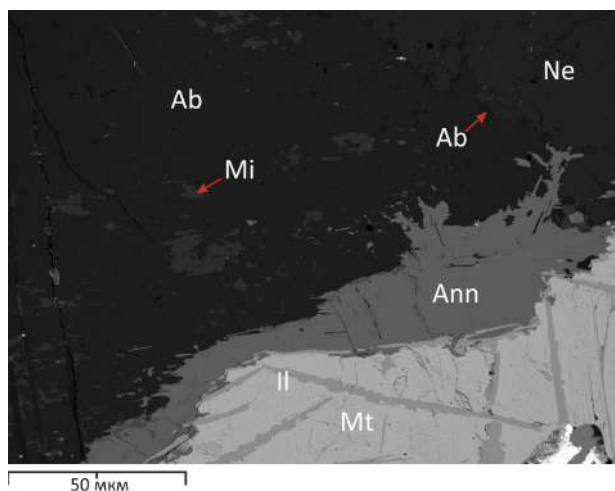


Рис. 4.23. Каемка из эгирина и аннита вокруг кристалла магнетита (ab – альбит, ann – аннит, il – ильменит, mi – микроклин, mt – магнетит, ne – нефелин)

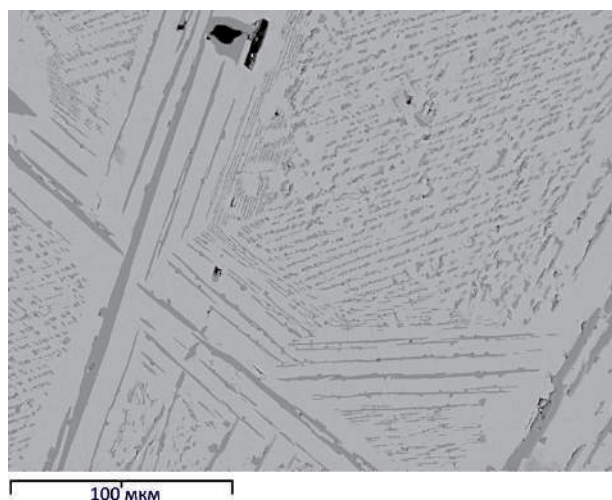


Рис. 4.24. Ламелли распада твердого раствора в магнетите, образующие паркетную структуру: магнетит (mt) и ильменит (il).

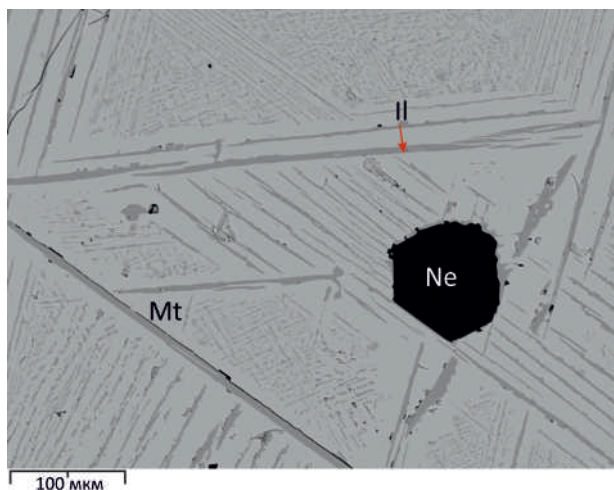


Рис. 4.25. Идоморфный кристалл нефелина в магнетите (ail – ильменит, mt – магнетит, ne – нефелин)

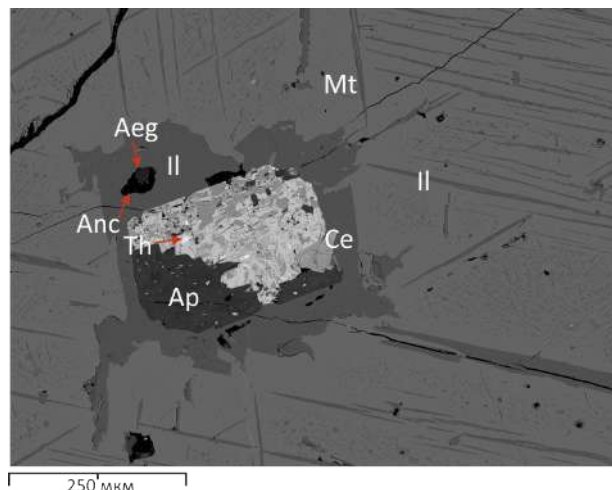


Рис. 4.26. Зональное включение в магнетите (ар – апатит, аег – эгирин, апс – анальцим, се – церит-(Ce), il – ильменит, mt – магнетит)

4.3.2 Акцессорные минералы

Акцессорные минералы весьма разнообразны (диагностировано 32 минеральных вида – табл. 4.3). Наиболее распространены вёлерит, циркон, торит, апатит, монацит. Морфология акцессориев также различна: пирохлор, велерит, торианит, – идиоморфны; бастнезит, монацит – ксеноморфны, церит, торит встречаются в виде включений в апатите, цирконе или пирохлоре. Интересной особенностью является одновременное присутствие оксидов и силикатов Th и Zr.

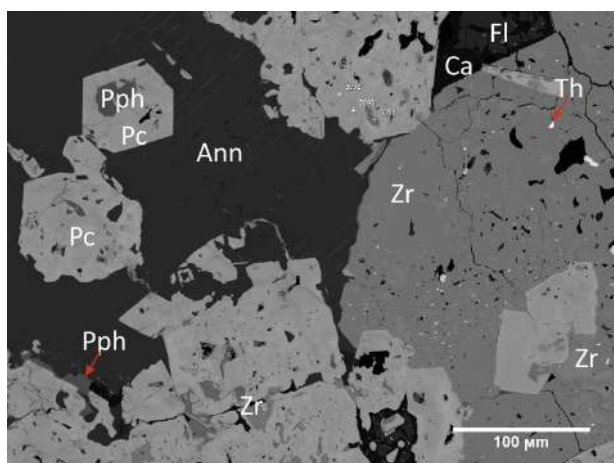


Рис. 4.27. Кристаллы пирохлора с высококремнистыми участками. (ann – аннит, са – кальцит, fl – флюорит, pc – пирохлор, pph – пиррофанит, th – торит, zr – циркон)

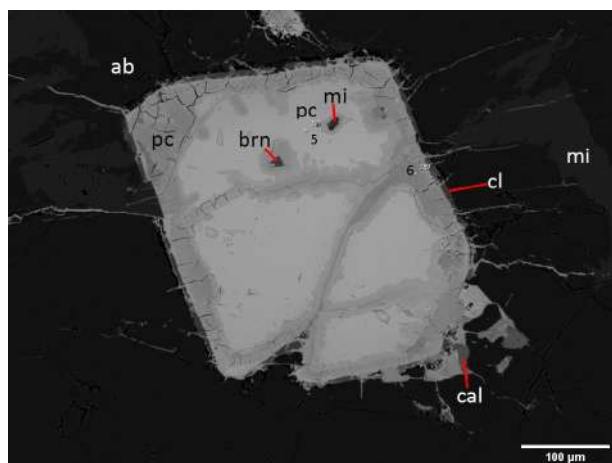


Рис. 4.28. Октаэдрический кристалл пирохлора в альбите. (ab – альбит, brn – бренкит, cal – кальцит, cl – хлорит, mi – микроклин)

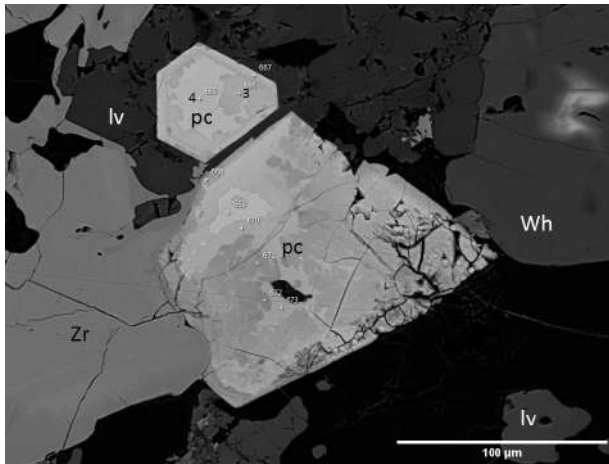


Рис. 4.29. Зональный кристалл пироклора и следами метамиктного распада (lv – ловенит, wh – вёлерит, zr – циркон)

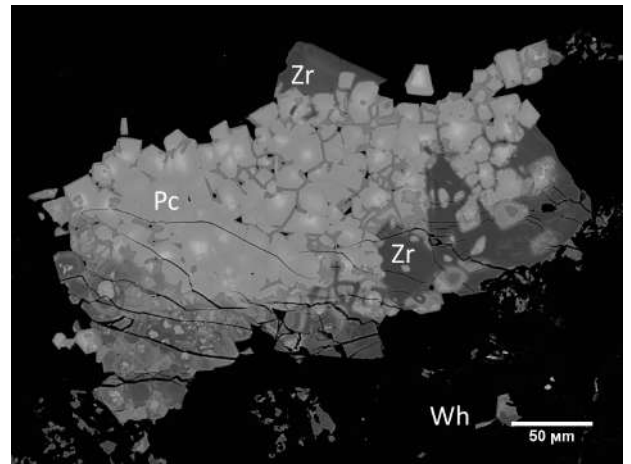


Рис. 4.30. Скопление кристаллов пироклора в ассоциации с цирконом в вёлерите (pc – пироклор, wh – вёлерит, zr – циркон)

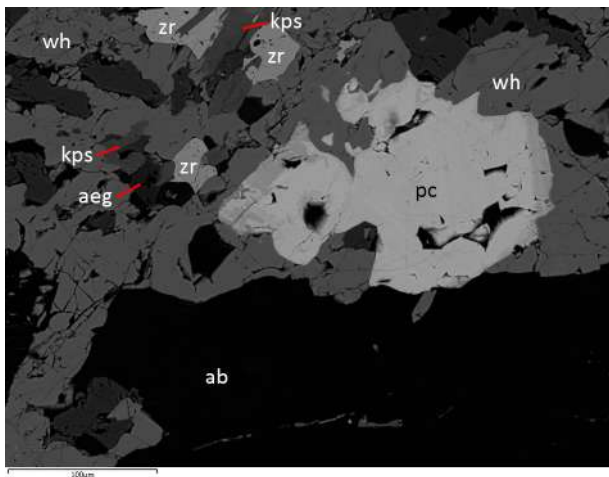


Рис. 4.31. Зональный кристалл пироклора и следами метамиктного распада (lv – ловенит, wh – вёлерит, zr – циркон)

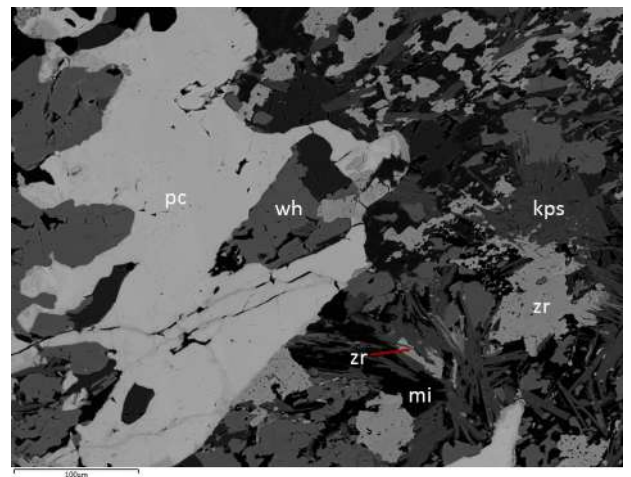


Рис. 4.32. Скопление кристаллов пироклора в ассоциации с цирконом в вёлерите (pc – пироклор, wh – вёлерит, zr – циркон)

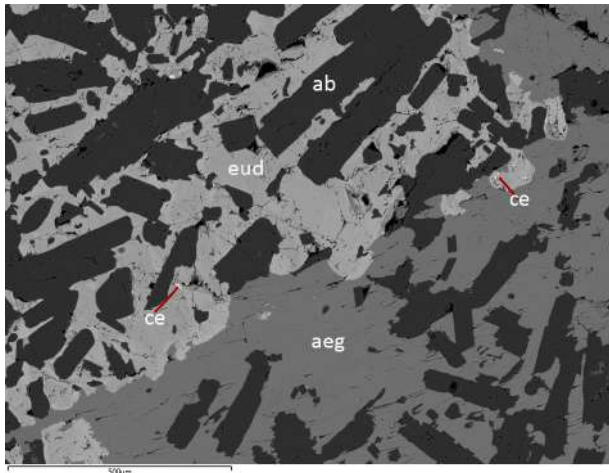


Рис. 4.33. Зональный кристалл пироклора и следами метамиктного распада (lv – ловенит, wh – вёлерит, zr – циркон)

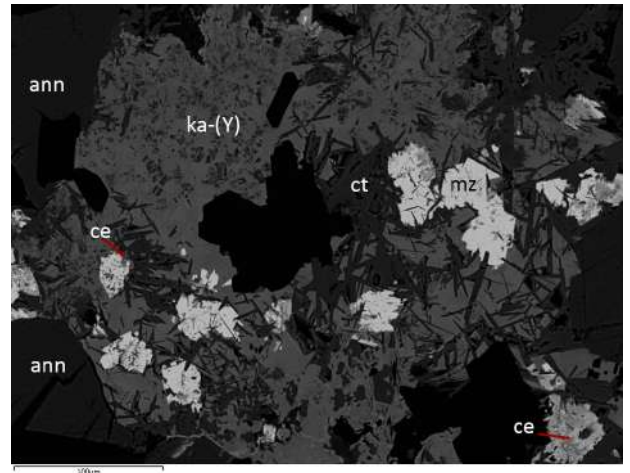


Рис. 4.34. Скопление кристаллов пироклора в ассоциации с цирконом в вёлерите (pc – пироклор, wh – вёлерит, zr – циркон)

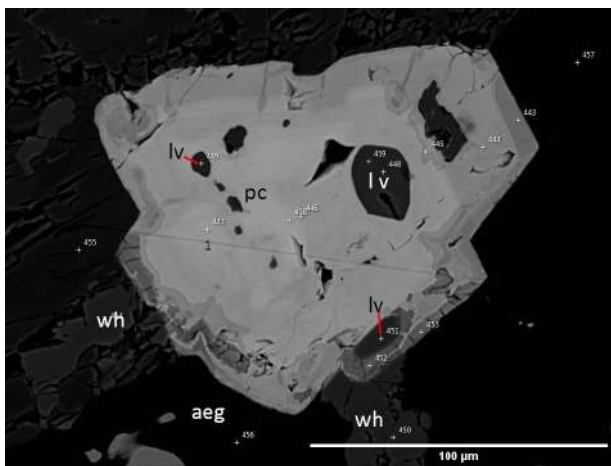


Рис. 4.35. Зональный кристалл пироклора с включением ловенита (aeg – эгирин, lv – ловенит, pc – пироклор, wh – вёлерит)

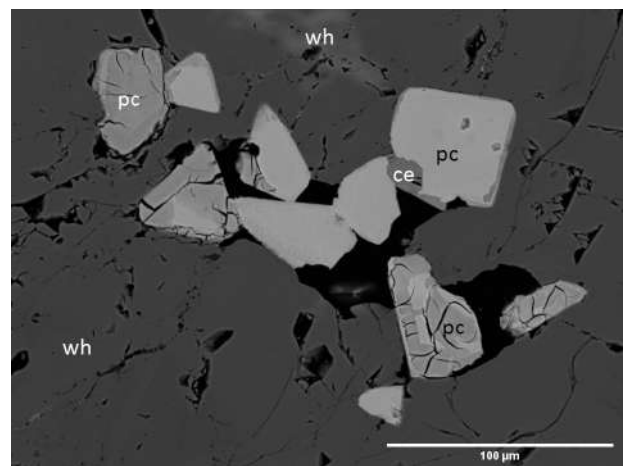


Рис. 4.36. Метамиктные кристаллы пироклора в вёлерите (ce – церит-(Ce), pc – пироклор, wh – вёлерит)

Минералы группы вёлерита

Вёлерит — распространенный акцессорный минерал пегматитов Сагасен. Минерал хорошо узнается макроскопически по характерному желтому цвету и форме кристаллов, присутствуют выделения до нескольких сантиметров. Встречается в виде призматических кристаллов, а также в зернистых массах. В вёлерите можно часто обнаружить микроскопические включения пироксенов, в виде кристаллов правильной формы или их скоплений (рис. 4.34). Химический состав вёлерита стабилен, в качестве примесей в небольшом количестве присутствуют Mn, Fe, Ti (табл. 4.1).

Ловенит макроскопически в образцах диагностируется с трудом. Минерал образует зернистые массы бурового цвета, схож йортдалитом и другими минералами группы вёлерита и минералами группы эвдиалита и астофиллита. В электронном микроскопе наблюдается срастания ловенита с вёлеритом (рис. 4.33), иногда ловенит является включением в других минералах (рис 4.35) при этом ловенит встречается гораздо реже, чем вёлерит.

Эмпирические формулы минералов группы вёлерита 4.1

1. $Na_{1,00}(Ca_{1,90}Fe_{0,07}, Mn_{0,10})_{\Sigma=1,98}(Zr_{0,47}Nb_{0,41}Ti_{0,04})_{\Sigma=0,92}Si_{2,01}O_{7,00}(O_{1,26}, F_{0,74})_{\Sigma=2,00}$
вёлерит
2. $Na_{1,00}(Ca_{1,90}Mn_{0,09}Fe_{0,08})_{\Sigma=2,07}(Zr_{0,47}Nb_{0,41}Ti_{0,03})_{\Sigma=0,91}Si_{2,02}O_{7,00}(O_{1,23}, F_{0,77})_{\Sigma=2,00}$
вёлерит
3. $Na_{0,99}(Ca_{1,92}Mn_{0,09}Fe_{0,08})_{\Sigma=1,99}(Zr_{0,47}Nb_{0,37}Ti_{0,05})_{\Sigma=0,92}Si_{2,04}O_{7,00}(O_{1,25}(OH)_{0,10}F_{0,65})_{\Sigma=2,00}$
вёлерит
4. $(Na_{1,30}Ca_{0,70})_{\Sigma=2,00}(Mn_{0,54}Ca_{0,37}Fe_{0,09})_{\Sigma=1,00}(Zr_{0,76}Nb_{0,13}Ti_{0,10}Y_{0,03})_{\Sigma=1,00}Si_{1,98}O_{7,00}(O_{93}(OH)_{0,11}F_{0,94})_{\Sigma=2,00}$
ловенит
5. $(Na_{1,35}Ca_{0,65})_{\Sigma=2,00}(Mn_{0,55}Ca_{0,37}Fe_{0,09})_{\Sigma=1,01}(Zr_{0,76}Nb_{0,13}Ti_{0,11})_{\Sigma=1,01}Si_{1,99}O_{7,00}(O_{0,74}(OH)_{0,27}F_{0,99})_{\Sigma=2,00}$
ловенит
6. $(Na_{1,34}Ca_{0,66})_{\Sigma=2,00}(Ca_{0,58}Mn_{0,34}Fe_{0,13})_{\Sigma=1,07}(Zr_{0,72}Nb_{0,15}Ti_{0,07}Y_{0,05})_{\Sigma=0,99}Si_{1,96}O_{7,00}(O_{0,71}(OH)_{0,30}F_{0,99})_{\Sigma=2,00}$
ловенит

Таблица 4.1. Химический состав вёлерита (1-2) и ловенита (3-6)

№	1	2	3	4	5	6
Na ₂ O	7,48	7,53	7,19	9,86	10,26	10,37
SiO ₂	29,34	29,44	28,92	29,15	29,08	29,34
CaO	25,88	25,85	25,30	14,66	14,22	17,58
TiO ₂	0,68	0,67	0,90	2,01	2,11	1,42
MnO	1,64	1,53	1,45	9,39	9,55	5,99
FeO	1,30	1,31	1,32	1,51	1,65	2,27
Y ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,72	0	1,28
ZrO ₂	14,01	14,00	13,76	22,99	22,9	22,12
Nb ₂ O ₃	13,20	13,18	11,49	4,31	4,18	4,89
F	3,42	3,53	2,89	4,39	4,63	4,70
Σ	96,95	97,04	93,22	98,99	98,58	99,96
-O=F ₂	1,71	1,76	1,44	2,20	2,32	2,35
Σ_{final}	95,24	95,28	91,78	96,80	96,27	97,61
Формульные коэффициенты,						
	Σ			катионов = 6		
Na	1,00	1,00	0,99	1,30	1,35	1,34
Ca	1,90	1,90	1,92	1,07	1,02	1,26
Mn	0,10	0,09	0,09	0,54	0,55	0,34
Fe	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,13
Zr	0,47	0,47	0,47	0,76	0,76	0,72
Nb	0,41	0,41	0,37	0,13	0,13	0,15
Ti	0,04	0,03	0,05	0,10	0,11	0,07
Y	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,05
Si	2,02	2,02	2,04	1,98	1,99	1,96
O	1,26	1,23	1,25	0,93	0,74	0,71
OH	0,00	0,00	0,10	0,11	0,27	0,30
F	0,74	0,77	0,65	0,94	0,99	0,99

Минералы группы пирохлора

В исследуемых образцах пирохлоры распространенные акцессорные минералы. Макроскопически наблюдаются медово-желтые или коричневые кристаллы (до 5 мм) изометричного облика. Встречаются в виде включений в породообразующих минералах (полевых шпатах, нефелине, анните), а также часто в ассоциации с цирконом, вельеритом и флюоритом. Кристаллы идиоморфны, имеют кубический или гексооктаэдрический габитус. Некоторые кристаллы подвержены метамиктному распаду (рис. 4.33). В метамиктных кристаллах также сохраняются внешние кубические и октаэдрические формы.

Химический состав очень непостоянный (табл. 4.37). По данным электронно-зондового микроанализа и согласно современной номенклатуре (Atencio et al., 2010) большинство проанализированных минералов следуют относить к гидроксокальциопирохлору (hydroxycalcio-pyrochlore) и фторкальциопирохлору (hydroxycalcio-pyrochlore), реже встречается фторнатропирохлор (fluornatropyrochlore). Кроме того, многие из минералов содержат большое количество примесей. Так содержание U в минерале может достигать 0,28 ф. к., Се — 0,30 ф. к., Sr — 0,16 ф. к.. Пирохлоры из пегматитов зачастую обладают зональным строением. Наблюдаются существенно кремнистые зоны или небольшие изолированные участки, которые могут располагаться как в центре (рис. 4.34), так и на периферии кристалла (рис. 4.35). Часто зоны окремнения располагаются по вдоль протяженных, вероятно более ранних, трещин (рис. 4.28), или образуют вокруг себя структуры, подобные трещинам усыхания (рис. 4.33)

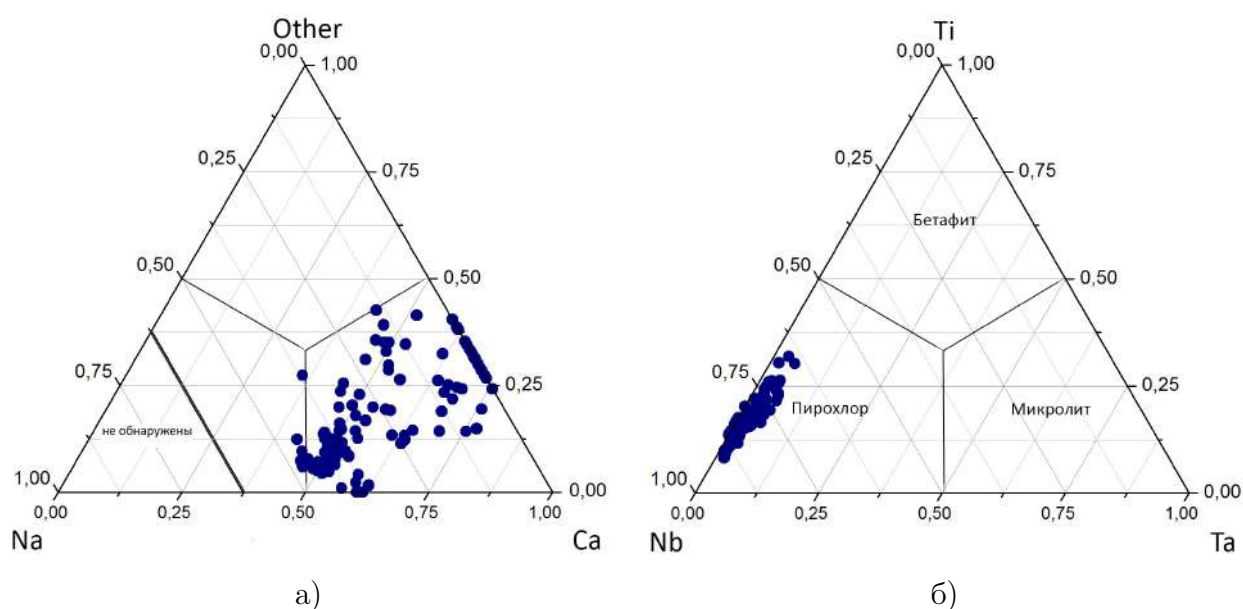


Рис. 4.37. Минералы группы пирохлора: а) позиция A: other — K, Mn, REE, U, Th б) позиция B

Эмпирические формулы минералов группы пирохлора (химический состав в табл. 4.2)

1. $(Ca_{0,99}Na_{0,84}U_{0,13}Ce_{0,05}Sr_{0,04}Th_{0,02}Fe_{0,01})_{\Sigma=2,08}(Nb_{1,44}Ti_{0,40}Si_{0,09}Ta_{0,07})_{\Sigma=2}O_{6,00}$
 $(F_{0,59}(OH)_{0,53})$
 фторкальциопирохлор
2. $(Ca_{1,01}Na_{0,84}U_{0,10}Sr_{0,04}Th_{0,02})_{\Sigma=2,01}(Nb_{1,48}Ti_{0,34}Si_{0,10}Ta_{0,08})_{\Sigma=2}O_{6,00}(F_{0,61}(OH)_{0,03})$
 фторкальциопирохлор
3. $(Ca_{0,57}Na_{0,27}U_{0,10}Ce_{0,06}Fe_{0,01}Mn_{0,01})_{\Sigma=0,89}(Nb_{1,39}Ti_{0,42}Ta_{0,11})_{\Sigma=2}O_{5,97}(OH)_{0,03}$
 гидроксокальциопирохлор
4. $(Ca_{0,51}Na_{0,16}K_{0,05}U_{0,12}Ce_{0,05})_{\Sigma=0,89}(Nb_{1,39}Ti_{0,42}Ta_{0,11})_{\Sigma=2}O_{5,22}(OH)_{0,54}$
 гидроксокальциопирохлор
5. $(Ca_{1,03}Na_{0,63}Ce_{0,09}Nd_{0,03})_{\Sigma=1,77}(Nb_{1,52}Ti_{0,28}Zr_{0,04}Si_{0,03})_{\Sigma=2}O_{5,90}((OH)_{0,01}F_{0,49})$
 фторкальциопирохлор
6. $(Ca_{0,79}Ce_{0,07}U_{0,06}Th_{0,02})_{\Sigma=0,96}(Si_{0,79}Nb_{0,72}Ti_{0,39}Ta_{0,08})_{\Sigma=2}O_{4,90}(OH)_{1,10}$
 гидроксокальциопирохлор (?)
7. $(Ca_{0,97}Na_{0,70}Ce_{0,05}Th_{0,03}Nd_{0,1})_{\Sigma=1,88}(Nb_{1,37}Ti_{0,46}W_{0,08}Ta_{0,08})_{\Sigma=2}O_{6,00}((OH)_{0,11}F_{0,63})$
 фторкальциопирохлор
8. $(Ca_{0,93}Na_{0,65}U_{0,06}Sr_{0,05}Mn_{0,04}Ce_{0,04}Th_{0,02}Nd_{0,01})_{\Sigma=1,80}(Nb_{1,48}Ti_{0,30}Si_{0,09}Ta_{0,06})_{\Sigma=2}O_{6,00}$
 $(F_{0,55}(OH)_{0,06})$
 фторкальциопирохлор
9. $(Ca_{0,84}Na_{0,22}U_{0,13}Th_{0,02})_{\Sigma=1,21}(Nb_{1,35}Ti_{0,43}Ta_{0,10}Zr_{0,03})_{\Sigma=2}O_{5,44}((OH)_{0,56}F_{0,44})$
 гидроксокальциопирохлор
10. $(Na_{0,90}Ca_{0,87}U_{0,13}Th_{0,03}Ce_{0,03}Nd_{0,1})_{\Sigma=1,88}(Nb_{1,34}Ti_{0,43}Ta_{0,10}Zr_{0,05})_{\Sigma=2}O_{5,71}(F_{0,91}(OH)_{0,20})$
 фторнатропирохлор

Таблица 4.2. Химический состав минералов группы пироклора

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na ₂ O	6,47	6,56	2,09	1,23	5,39		5,43	5,35	1,69	7,22
K ₂ O				0,61						
CaO	13,90	14,22	7,93	7,09	15,82	12,95	13,58	13,73	11,61	12,55
MnO	0,16		1,85							
FeO			0,27					1,86		
SrO	0,91	1,13	1,23					1,31		
CeO	1,78		2,36	2,10	3,84	3,39	1,76	1,67		1,09
Nd ₂ O ₃	0,21		0,44		0,74	1,08	0,57	0,35		0,41
ThO ₂	1,40	1,56	2,05			1,79	2,02	1,41	1,53	2,20
UO ₅	8,71	6,56	6,75	7,84		4,41	7,97	4,57	8,85	8,87
SiO ₂	1,38	1,52	1,30		0,57	13,97		1,35		
TiO ₂	7,99	6,91	6,97	8,28	6,10	9,05	9,23	6,28	8,61	8,95
W ₂ O ₃							2,96			
ZrO ₂					2,22	0,86			1,04	1,58
Nb ₂ O ₅	47,79	49,44	48,90	46,26	55,39	27,87	45,55	51,98	44,43	45,93
Ta ₂ O ₅	3,63	4,48	4,95	6,06	1,58	5,05	4,54	3,49	5,44	5,72
F	2,82	2,90			2,56		2,98	2,76	2,06	4,48
Σ	95,29	95,28	87,09	90,57	91,84	80,42	93,69	84,12	84,20	95,95
-O=F ₂	1,41	1,45	0,00	0,00	1,28	0,00	1,49	1,38	1,03	2,24
Σ_{final}	93,88	93,83	87,09	90,57	90,56	80,42	92,2	82,74	83,17	93,71
Формульные коэффициенты ($\Sigma B=2$)										
Na	0,84	0,84	0,27	0,16	0,63	0,00	0,70	0,65	0,22	0,90
K	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,99	1,01	0,57	0,51	1,03	0,79	0,97	0,93	0,84	0,87
Fe	0,01	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
Sr	0,04	0,04	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00
Ce	0,05	0,00	0,06	0,05	0,09	0,07	0,05	0,04	0,00	0,03
Nd	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01
Th	0,02	0,02	0,03	0,00	0,00	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03
U	0,13	0,10	0,10	0,12	0,00	0,06	0,12	0,06	0,13	0,13
ΣA	2,08	2,01	1,20	0,89	1,77	0,96	1,88	1,80	1,21	1,96
Si	0,09	0,10	0,09	0,00	0,03	0,79	0,00	0,09	0,00	0,00
Ti	0,40	0,34	0,35	0,41	0,28	0,39	0,46	0,30	0,43	0,43
W	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00
Zr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,02	0,00	0,00	0,03	0,05
Nb	1,44	1,48	1,47	1,39	1,52	0,72	1,37	1,48	1,35	1,34
Ta	0,07	0,08	0,09	0,11	0,03	0,08	0,08	0,06	0,10	0,10
ΣB	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
O	6,00	6,00	5,97	5,22	5,90	4,90	6,00	6,00	5,44	5,71
F	0,59	0,61	0,00	0,00	0,49	0,00	0,63	0,55	0,44	0,91
OH ⁻	0,53	0,37	0,03	0,54	0,10	1,10	0,11	0,06	0,56	0,20

4.4 Рамановская спектроскопия

С помощью рамановской спектроскопии было подтверждено наличие следующих минералов: куплетскит, катаплеит, вёлерит, серандит.

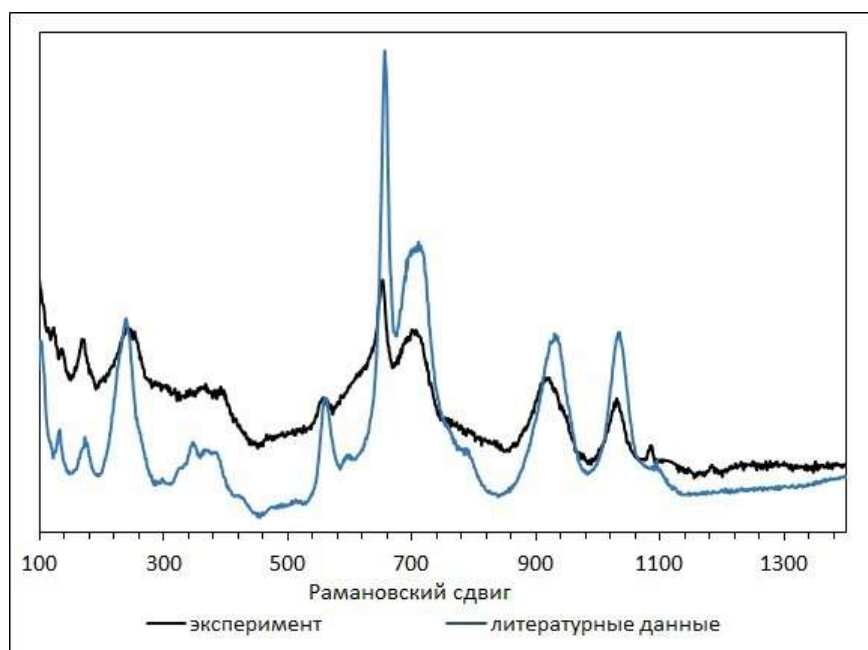


Рис. 4.38. Рамановский спектр куплетскита. Лазер - 514 нм. Литературные данные – RRUFF R060202 (514 нм)

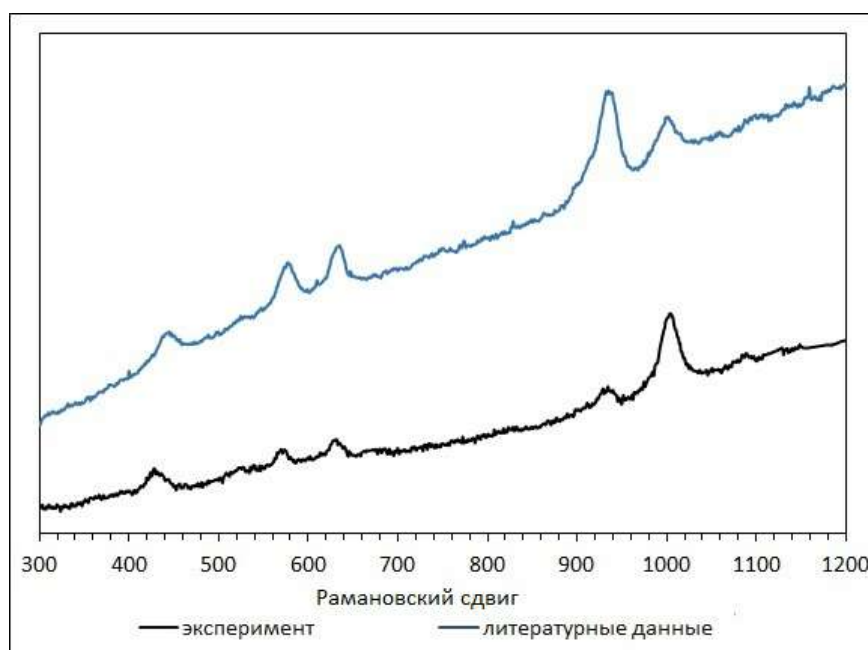


Рис. 4.39. Рамановский спектр катаплеита. Лазер - 514 нм. Литературные данные – RRUFF R040005 (532 нм)

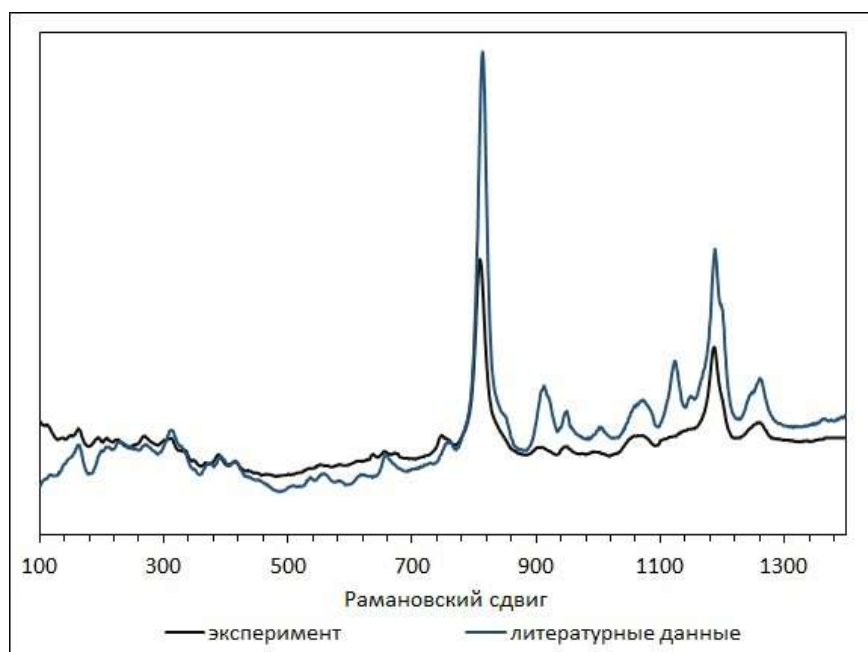


Рис. 4.40. Рамановский спектр вёлерита. Лазер - 514 нм. Литературные данные – RRUFF R050275 (514 нм)

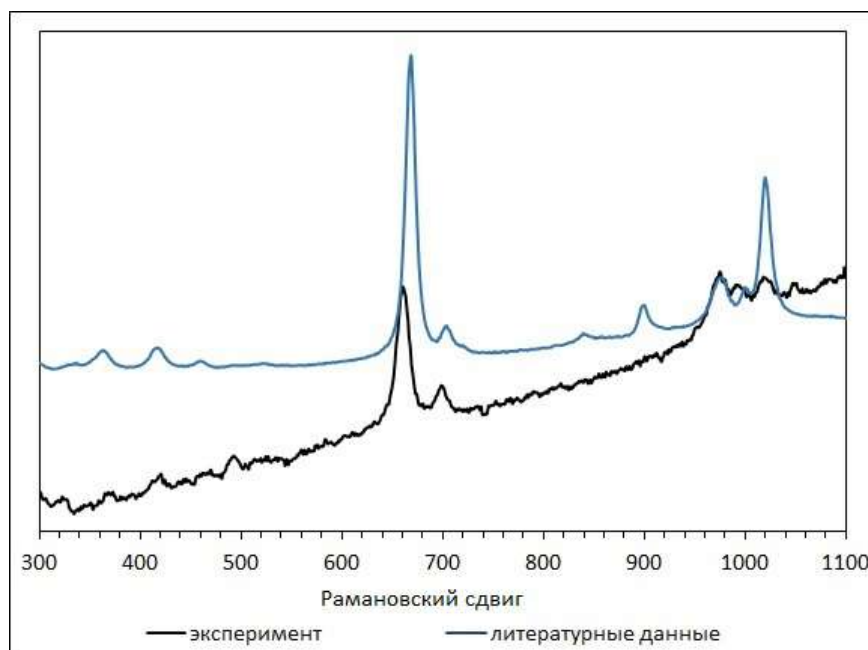


Рис. 4.41. Рамановский спектр серандита. Лазер - 514 нм. Литературные данные – RRUFF R040056 (514 нм)

В результате исследования образцов пегматитов точными инструментальными методами было установлено 43 минерала, принадлежащих к 8 различным классам: 3 простых сульфида, 3 простых оксида, 6 сложных оксида, 26 силикатов и их аналогов, 3 фосфата, 4 карбоната, 1 фторид. Полученные данные представлены в таблице 4.3

Таблица 4.3. Минералы пегматитов, обнаруженные точными инструментальными методами (оптическая микроскопия — 1, рентгенофазовый анализ — 2, электронно-зондовый микроанализ — 3, рамановская спектроскопия — 4)

Название	Способ диагностики				Примеси	Номер образца
	1	2	3	4		
Тип: сернистые соединения и их аналоги						
Класс: простые сульфиды						
Галенит	+	-	+	-		L-06-1, 14-S-N18
Сфалерит	+	-	+	-	Fe	L-01-1, L-10-2
Молибденит	+	+	+	-		14-S-N18
Тип: кислородные соединения						
Класс: простые оксиды						
Бадделеит	-	-	+	-	Fe, Ca, Hf	L-01-1
Торианит	+	+	+	-	Y, REE	L-01-1, L-10-2
Класс: сложные оксиды						
Ильменит	+	+	+	-	Mn	L-01-4, L-04-1
Пирофанит	+	+	+	-	Fe	L-04-1, L-07-1, L-10-1, L-10-2
Магнетит	+	+	+	-	Mn, Ti	L-01-4, L6-1, 43-S-N18
Группа пирохлора						
Гидроксокальцопирохлор	+	-	+	+	Sr, Mn, Fe, Th, U, REE	L-06-1, L-07-1, L-07-2, 12-S-N18, 14-S-N18, 43-S-N18
Фторкальцопирохлор	+	-	+	+	Sr, Mn, Fe, Th, U, REE	L-06-1, L-07-1, L-07-2, 12-S-N18, 14-S-N18
Фторнатропирохлор	+	-	+	+	Sr, Th, U, REE	L-06-1, L-07-1, L-07-2
Класс: силикаты и их аналоги						

Подкласс: силикаты островной структуры						
Циркон	+	-	+	-	Hf	L-01-1, L-04-1, L-06-1, L-O7-1, L07-2, L10-1, L10-2, 12-S-N18, 14-S-N18, 22-S-N18, 43-S-N18
Торит	+	-	+	-	Zr	L-01-1, L-04-1, L-06-1, L-O7-1, L07-2, L10-1, L10-2, 14-S-N18, 22-S-N18
Церит-(Ce)	-	-	+	-	La, Ca	L-04-1, L-06-1, L-10-2, 14-S-N18, 22-S-N18
Титанит	-	-	+	-	Fe	L-06-1
Бритолит-(Ce)	-	-	+	-	Y, REE	L-06-1, L10-1
Группа куспидина						
Вёлерит	+	+	+	+	Mn, Ti	L-06-1, 12-S-N18, 14-S-N18, 43-S-N18
Ловенит	+	-	+	+	Fe, Y	14-S-N18 43
Подкласс: силикаты кольцевой структуры						
Кайнозит-(Y)	-	-	+	+	REE, Th	L-01-1, L-04-1, L-06-1, L-O7-1, L07-2, L10-1, L10-2, 14-S-N18, 22-S-N18
Катаплеит	-	-	+	+		22-S-N18
Эвдиалит	+	+	+	+	Mn	12-S-N18, 14-S-N18, 43-S-N18
Подкласс: силикаты цепочечной структуры						
Группа пироксенов						
Эгирин	+	+	+	+	Mg, Ca	L-01-1, L-04-1, L-06-1, L-O7-1, L07-2, L10-1, L10-2, 12-S-N18, 14-S-N18, 22-S-N18, 43-S-N18
Группа волластонита						
Пектолит	-	-	+	+	Mn	
Серандит	-	-	+	+	Ca	14-S-N18
Группа астрофиллита						

Куплетскит	+	-	+	+	Nb	14-S-N18
Подкласс: силикаты ленточной структуры						
Группа амфиболов						
Феррогорнблендит	+	+	-	-		L-01-1
Подкласс: силикаты и алюмосиликаты слоистой структуры						
Группа слюд						
Мусковит	+	-	+	-		L-01-1, L-04-1, L-06-1, L10-1, L10-2
Аннит	+	+	+	-	Mg	L-01-1, L-04-1, L-06-1, L-07-1, L07-2, L10-1, L10-2, 12-S-N18, 22-S-N18, 43-S-N18
Группа хлорита						
Шамозит	+	+	+	-		L-01-1
Пеннантит	+	+	+	-	Fe	L-01-1
Подкласс: каркасные алюмосиликаты						
Простые каркасные алюмосиликаты						
Микроклин	+	+	+	-	Na	L-01-1, L-04-1, L-06-1, L10-1, L10-2, 12-S-N18, 14-S-N18, 22-S-N18, 43-S-N18
Альбит	+	+	+	-	K	L-01-1, L-04-1, L-06-1, L10-1, L10-2, 12-S-N18, 14-S-N18, 22-S-N18, 43-S-N18
Нефелин	+	+	+	-	Fe	L-04-1, L-10-1, L-10-2, 12-S-N18, 14-S-N18, 22-S-N18, 43-S-N18
Каркасные алюмосиликаты с добавочными анионами						
Содалит	-	+	-	-		L2,
Канкринит	-	+	-	-		L-01-1, L-04-1, L-06-1, L10-1, L10-2
Водные каркасные алюмосиликаты (цеолиты)						

Анальцим	+	+	+	-		L-01-1, L-04-1, L-06-1, L-07-1, L07-2, L10-1, L10-2, 22-S-N18, 43-S-N18
Класс: фосфаты						
Монацит-(Ce)	+	+	+	-	La, Nb, Th	L-10-1, 22-S-N18
Ксенотим-(Y)	+	+	+	-		L-07-1
Фторапатит	+	+	+	-	REE	L-01-1, L-04-1, L-06-1, L-07-1, L07-2, L10-1, L10-2
Класс: карбонаты						
Кальцит	+	-	+	-	Mn	L-01-1, L-04-1, L-06-1, L-07-1, L07-2, L10-1, L10-2
Бастнезит	+	+	+	-		L-04-1, L-10-1, L-10-2
Бренкит	+	+	+	-		12-S-N18, 14-S-N18, 43-S-N18
Бурбанкит	+	+	+	-	REE	L-01-1
Класс: фториды						
Флюорит	+	+	+	-	REE	L-01-1, L-04-1, L-07-1, L07-2, 12-S-N18, 14-S-N18

4.5 Минеральные геотермометры

4.5.1 Полевые шпаты

В ходе исследования рассчитаны параметры элементарной ячейки для сосуществующих микроклина и альбита из пегматитов Сагасен (табл. 4.4). С использованием диаграммы Стюарта и Риббе установлено, что степень упорядоченности обоих минеральных видов максимальная (рис. 4.42). Наличие низкого альбита и микроклина говорит о медленном протекании процессов кристаллизации и последующего замещения микроклина альбитом.

Температура кристаллизации полевых шпатов определялась с помощью двуполево-шпатового термометра тремя методами (рис. 4.43, 4.43, 4.43). Исследование проводилась для полевых шпатов из пегматитов Сагасен, а также из миаскитовых пегматитов Ильменских гор.

Таблица 4.4. Параметры элементарной ячейки микроклина и альбита

№ обр.	Ab/Mi, %		п.э.я., Å			углы, °		
			a	b	c	α	β	γ
L1-1	46,5(7)/53,5(6)	Mi	8.593(1)	12.976(1)	7.228(1)	90.62(1)	115.95(1)	87.75(1)
		Ab	8.150(1)	12.800(1)	7.169(1)	94.24(1)	116.60(1)	87.70(0)
L4-1	46,5(7)/53,5(6)	Mi	8.583(1)	12.966(2)	7.224(1)	90.59(2)	116.00(1)	87.77(2)
		Ab	8.142(1)	12.790(1)	7.162(1)	94.23(1)	116.60(1)	87.70(1)
L10-2	46,5(7)/53,5(6)	Mi	8.582(1)	12.965(1)	7.223(1)	90.63(1)	115.94(1)	87.69(1)
		Ab	8.142(1)	12.790(1)	7.161(1)	94.24(0)	116.60(1)	87.68(0)

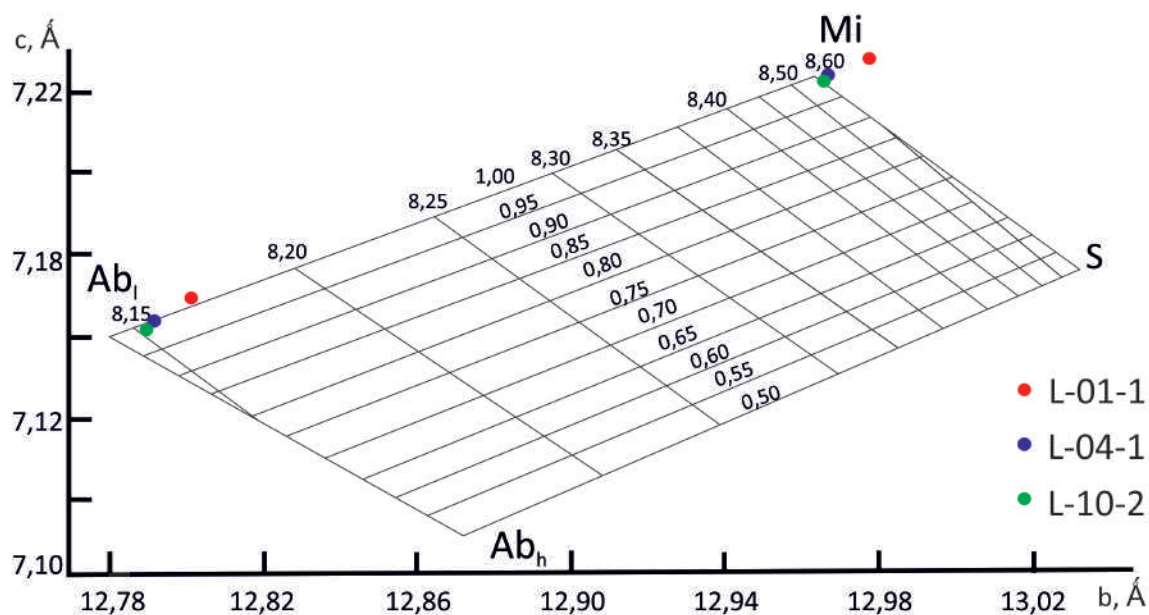


Рис. 4.42. Диаграмма для определения степени упорядоченности Al

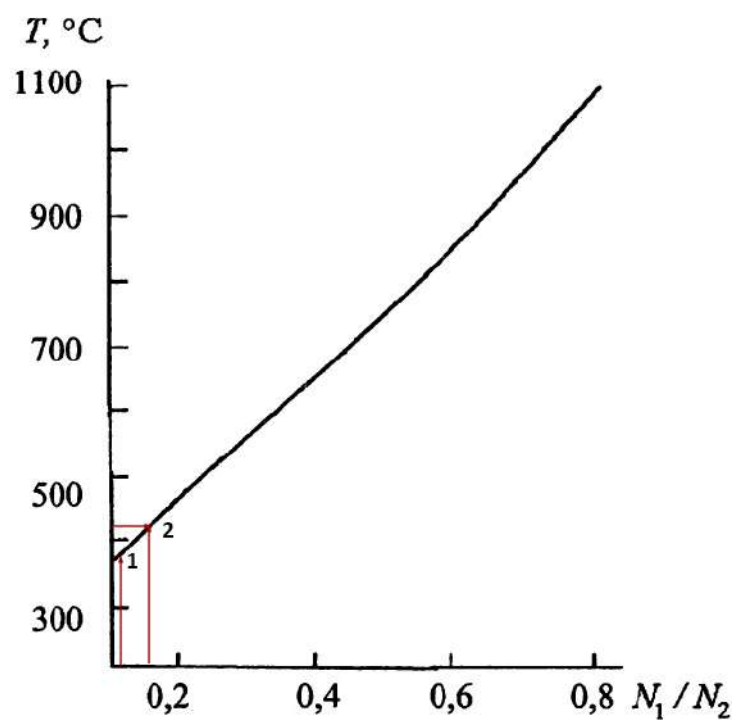


Рис. 4.43. Диаграмма Т. Барта (Барт, 1962): 1 — полевые шпаты из пегматитов Сагасен, 2 — полевые шпаты из пегматитов Ильменских гор. Альбитовая составляющая (в мол. %): N_1 — в микроклине, N_2 — в альбите

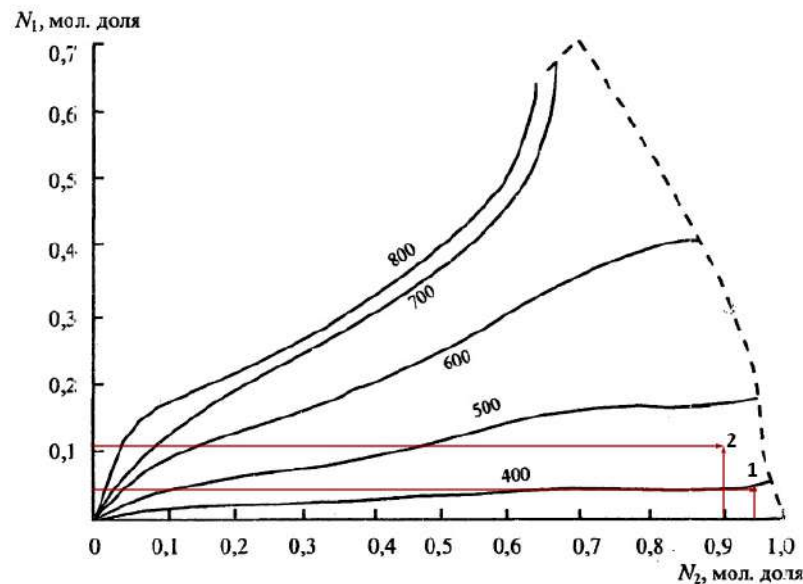


Рис. 4.44. Диаграмма Т. Барта (Барт, 1962): 1 — полевые шпаты из пегматитов Сагасен, 2 — полевые шпаты из пегматитов Ильменских гор. Альбитовая составляющая (в мол. %): N_1 — в микроклине, N_2 — в альбите

Таким образом, равновесная температура сосуществования микроклина и альбита в среднем составляет 350 ° для пегматитов Сагасен и 410 ° для полевых шпатов из миаскитовых пегматитов Ильменских гор.

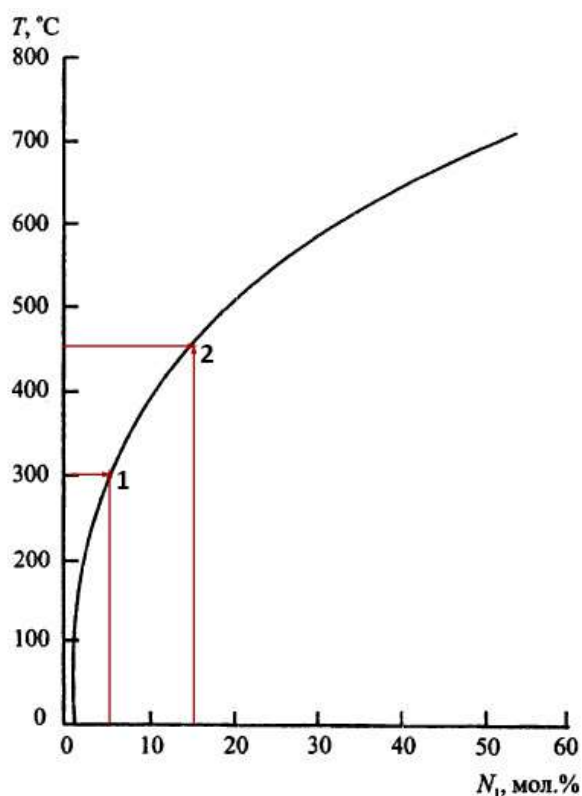


Рис. 4.45. Диаграмма В. В. Гордиенко (Гордиенко, 1976): 1 — полевые шпаты из пегматитов Сагасен, 2 — полевые шпаты из пегматитов Ильменских гор. Альбитовая составляющая (в мол. %): N_1 — в микроклине

Таблица 4.5. Состав сосуществующих полевых шпатов и температуры их равновесия по различным геотермометрам. Альбитовая составляющая (в мол. %): N_1 — в калиевом полевоом шпате

Минералы	Содержание компонентов		
	Na ₂ O, вес.%	K ₂ O, вес.%	аб составляющей, мол. доля
	Пегматиты Сагасен		
Микроклин	0,41	16,9	0,04
Альбит	11,31	0,17	0,96
N ₁ /N ₂	0,04		
	Пегматиты Ильменских гор		
Микроклин	1,22	14,92	0,11
Альбит	9,52	0,00	0,90
N ₁ /N ₂	0,12		
Использованные геотермометры и полученные температуры, С °			
	Пегматиты Сагасен		Пегматиты Ильменских гор
По Т. Брату	380		410
По И. Д. Рябчикову	350		450
По В. В. Гордиенко	310		380

4.5.2 Нефелин

Нефелин присутствует в трех шайбах, изготовленных из образцов пегматитов Сагасен. От центра к краю кристалла была проведена череда измерений химического состава нефелина. Точки электронно-зондового микроанализа располагаются вдоль прямой линии с шагом 200 мкм. На основании полученных данных рассчитываются миналы: NaAlSiO_4 , KAlSiO_4 , SiO_2 . Точки наносятся на тройную диаграмму с использованием программы OriginPro70.

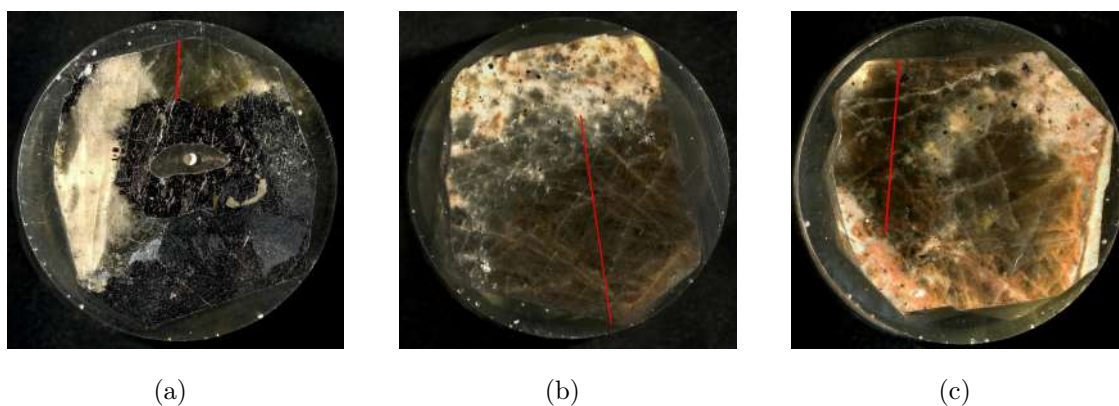


Рис. 4.46. Кристаллы нефелина из пегматитов Сагасен и профили, вдоль которых располагаются анализируемые точки: (a) — L-04-1; (b) — L-10-1; (c) — L-10-2. Диаметр шайбы — 2,54 см

На основании полученных составов нефелина были рассчитаны миналы. На диаграмме большинство точек попадает в область температур 700 — 1000 ° (4.47).

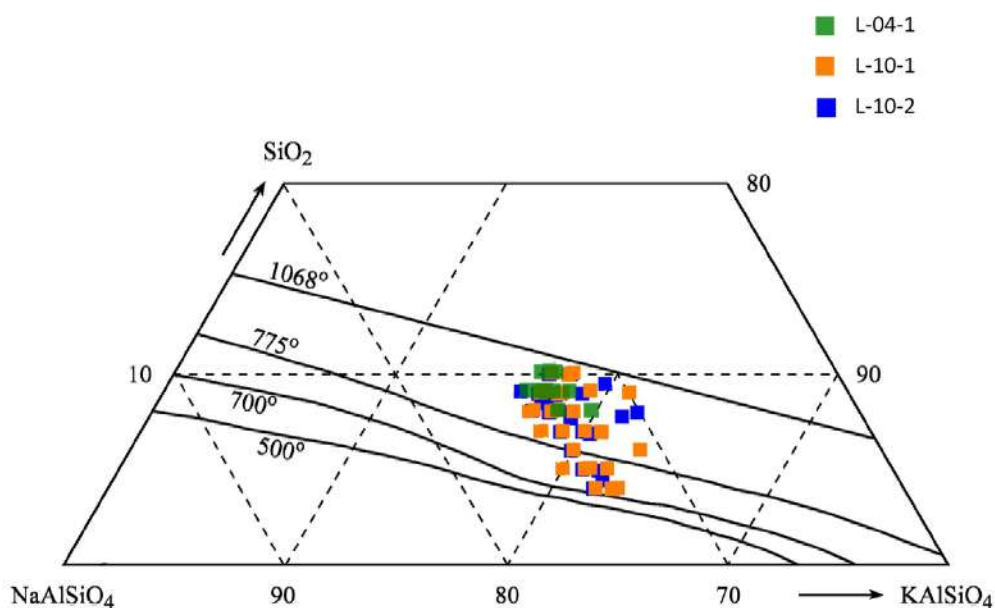


Рис. 4.47. Тройная диаграмма состава нефелина из пегматитов для трех образцов

В образце L-10-1 (рис. 4.46(b)) кристалл нефелина зональный. На диаграмме также обнаруживается две группы точек (рис. 4.48). На основании этого можно сделать

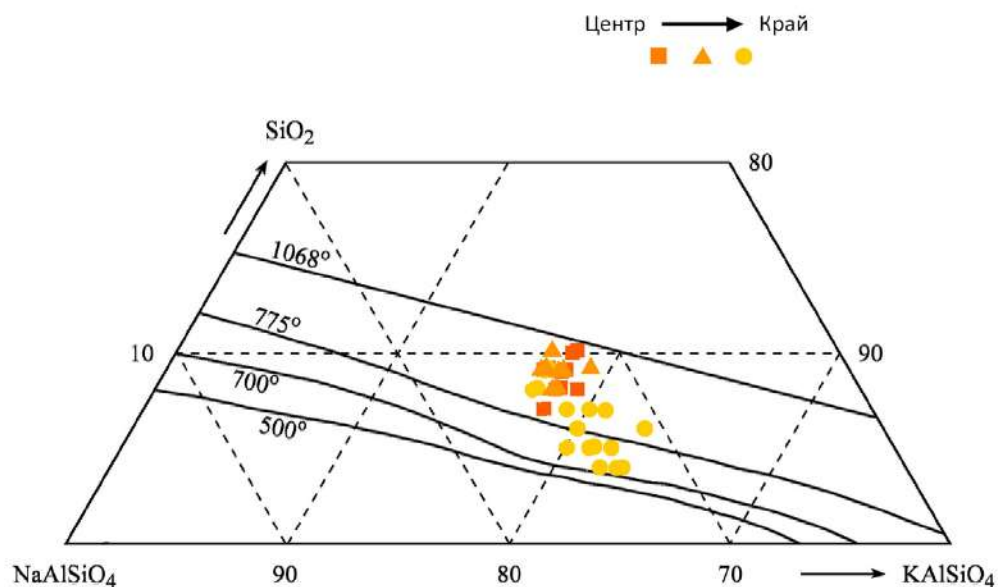


Рис. 4.48. Тройная диаграмма состава нефелина из пегматитов Сагасен. Образец L-10-1

вывод, что кристаллизация проходила в несколько этапов, внутренняя часть кристаллизовалась при температуре порядка 1000 °C, внешняя — 800–700 °C.

В других кристаллах зональности не наблюдается (рис. 4.49).

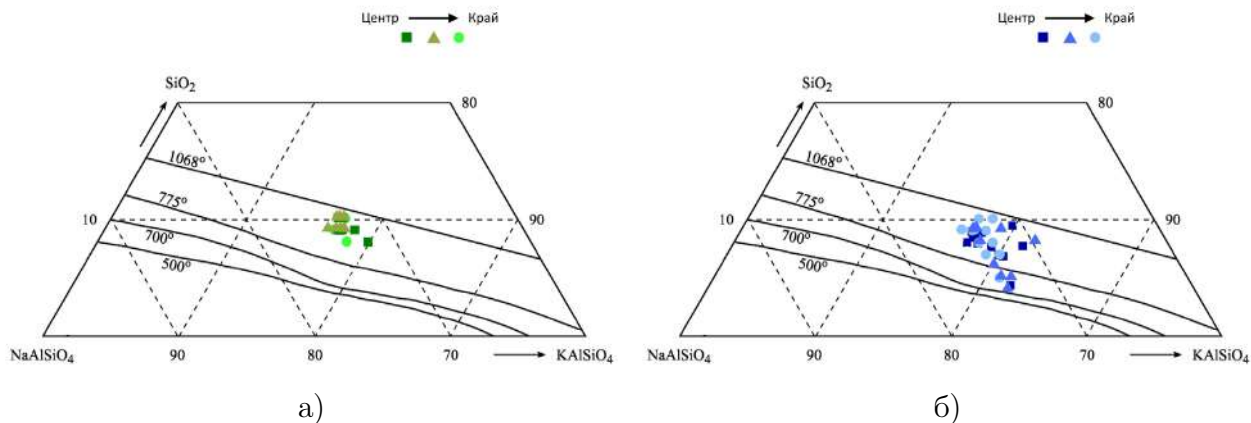
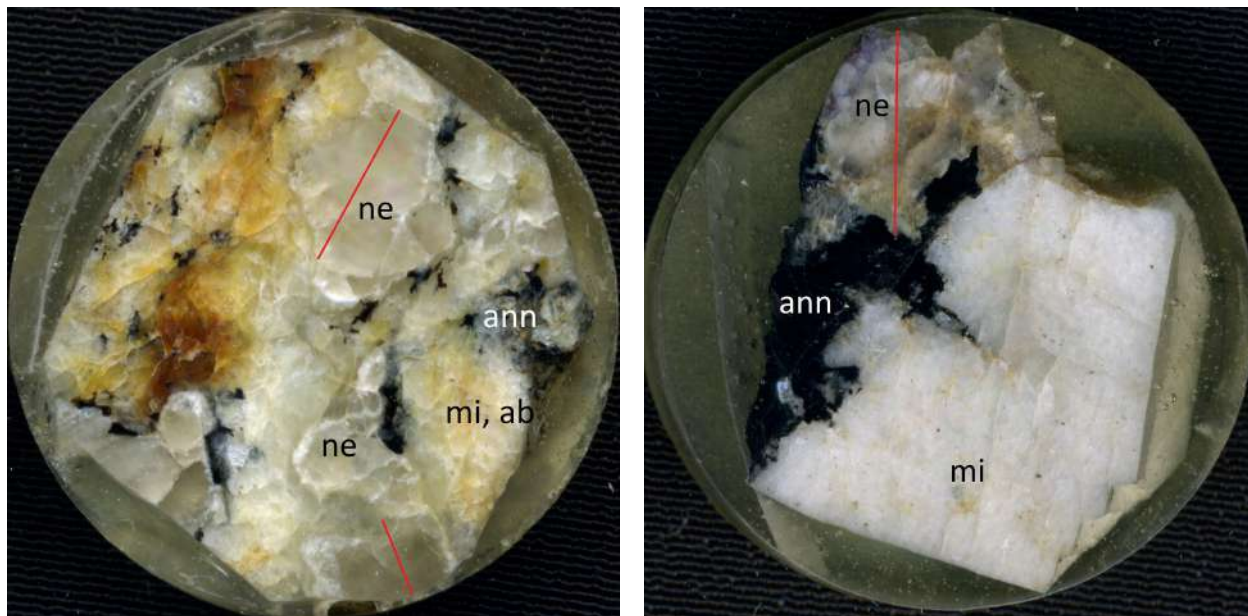


Рис. 4.49. Тройная диаграмма состава нефелина из пегматитов: а) образец L-4-1 б) образец L-10-2

Аналогичным образом был проанализирован нефелин из миаскитовых пегматитов Ильменских гор. Получена температура 750 — 900°C (рис. 4.51). Разброс значений на диаграмме значительно меньше.



а)

б)

Рис. 4.50. Кристаллы нефелина из пегматитов Ильменских гор и профили, вдоль которых располагаются анализируемые точки: а) копь №179 б) копь №7. Диаметр шайбы – 2,54 см

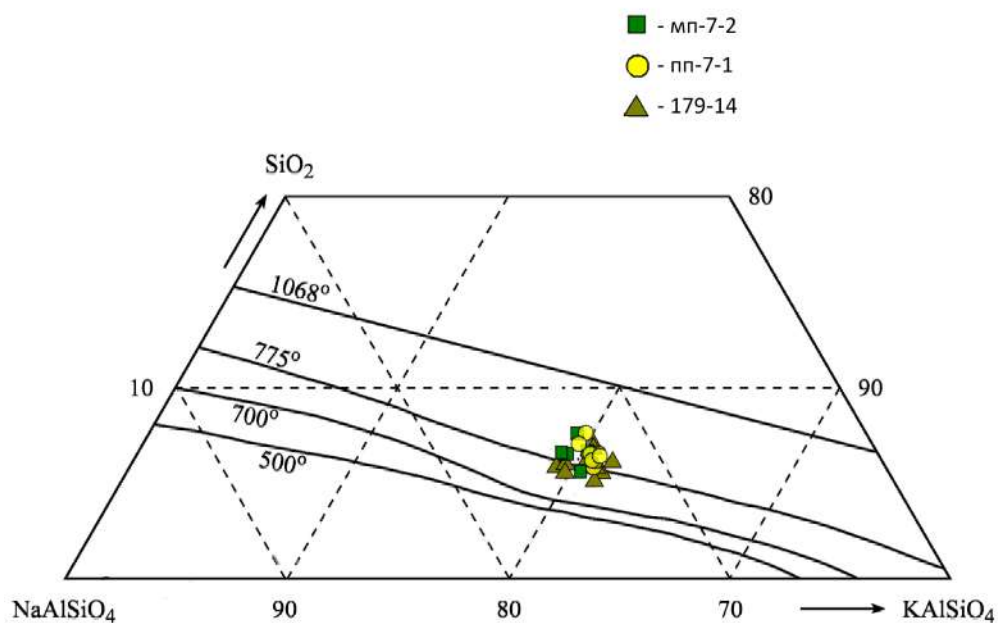


Рис. 4.51. Тройная диаграмма состава нефелина из миаскитовых пегматитов Ильменских гор для трех образцов

4.5.3 Магнетит — ильменит

Для пары минералов магнетит – ильменит (рис. 4.24) из пегматитов Сагасен были рассчитаны следующие параметры:

Таблица 4.6. Химический состав магнетита и ильменита

Вес.% оксидов	Mt	Il
TiO ₂	0,53	49,62
FeO	91,59	32,47
MnO	0,00	15,90
Сумма:	92,12	97,99
Пересчет Fe ²⁺ и Fe ³⁺		
Fe ₂ O ₃ вес. %	67,15	4,38
FeO вес. %	31,17	28,53
Сумма:	98,85	98,43
	Usp	Il
Мольные доли	2,25	1,47
Кислород	4,00	3,00
Формульные коэффициенты (Carmichael, 1967)		
Ti	0,02	0,96
Fe ⁺³	1,97	0,08
Fe ⁺²	1,02	0,61
Mn	0,00	0,35
Сумма:	3,00	2,00
Мольные доли, %		
Метод расчета	Usp	Ilm
Carmichael, 1967	0,0155	0,9577
Anderson, 1968	0,0155	0,9355
Spencer, K. J., Lindsley, 1981	0,0155	0,9355
Stormer, 1983	0,0155	0,9477

Таблица 4.7. Температура и фугитивность кислорода, рассчитанная для пары зерен магнетит — ильменит

Термометрия по Powell, R., Powell, M., 1977		
Метод расчета X'Usp & X'Ilm :	T, °C	
Carmichael, 1967	363,99	
Anderson, 1968	385,50	
Spencer, K. J., Lindsley, 1981	385,50	
Stormer, 1983	374,52	
\overline{T}_1	377,38	
Термобарометрия по Spencer, K. J., Lindsley, 1981		
Метод расчета X'Usp & X'Ilm :	T, °C	lg fO ₂
Carmichael, 1967	461,09	-27,71
Anderson, 1968	490,31	-25,01
Spencer, K. J., Lindsley, 1981	490,31	-25,01
Stormer, 1983	475,45	-26,35
$\overline{T}_2, \overline{lgfO_2}$	479,29	-26,02
Термобарометрия по Andersen and Lindsley, 1985		
Метод расчета X'Usp & X'Ilm :	T, °C	lg fO ₂
Carmichael, 1967	455,87	
Anderson, 1968	488,96	-24,89
Spencer, K. J., Lindsley, 1981	488,96	-24,89
Stormer, 1983	472,12	-26,31
$\overline{T}_3, \overline{lgfO_2}$	476,48	-25,36
$\overline{T}, \overline{lgfO_2}$	444,38	-25,74

Таким образом, распад твердого раствора с образованием магнетита и ильменита проходил при температуре 450°. При этом фугитивность кислорода составляла 10⁻²⁶.

Глава 5

Обсуждение результатов

5.1 Порядок кристаллизации пегматитов Сагасен. Генетическая диаграмма

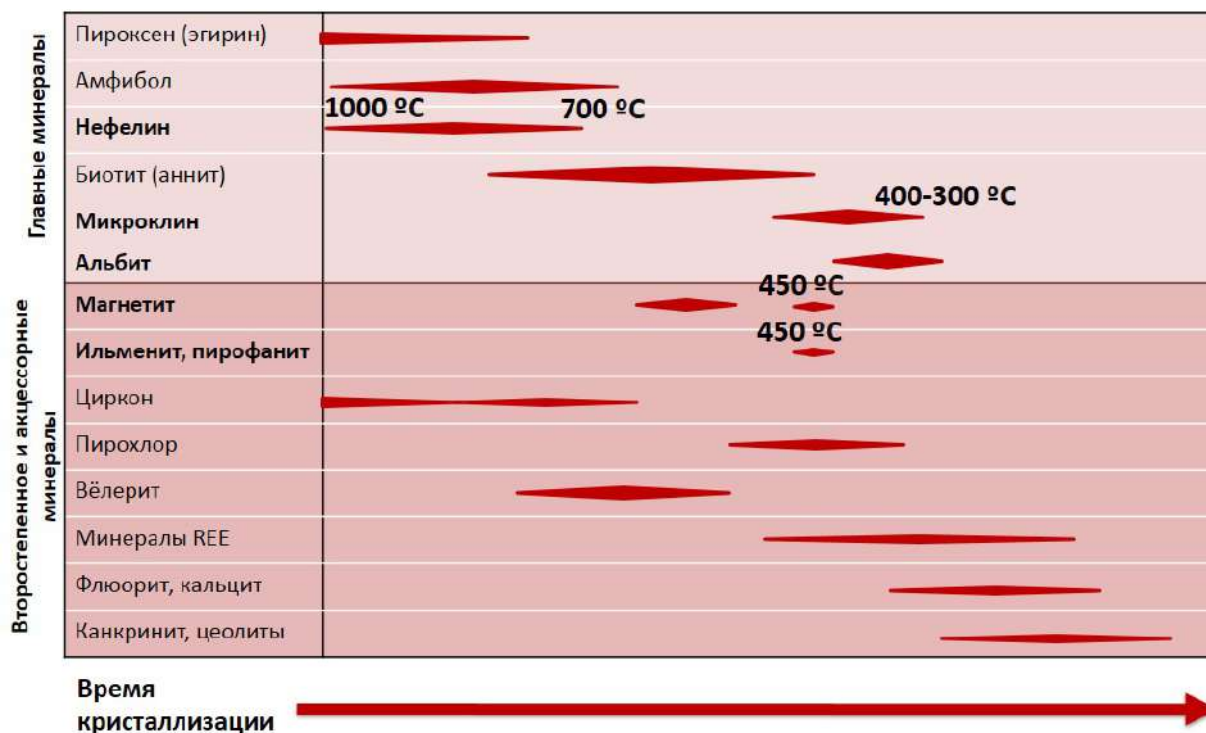


Рис. 5.1. Генетическая диаграмма пегматитов Сагасен

На основании взаимоотношения между минералами и степени их идиоморфизма был восстановлен порядок кристаллизации главных и акцессорных фаз (рис. 5.1). Так, первыми кристаллизовались пироксен (эгирин), амфибол (феррогорнблендит), нефелин; затем аннит и полевые шпаты (микроклин, альбит), магнетит. Первичными акцессорными минералами являются циркон и велерит. На позднем этапе образовывались флюорит, кальцит, пирохлоры, минералы редких земель. Вторичные изменения представлены канкринитом и цеолитом.

Начало формирования пегматитовых тел могло произойти сразу после внедрения батолита Ларвик. Химический состав первичных минералов примерно соответствует составу вмещающих монцонитов. Поздние минералы имеют значительно более разнообразный химический состав. Присутствуют минералы ниобия, циркония и редких земель. Эти химические элементы могли сконцентрироваться в результате переработки вмещающих пород или были принесены флюидами.

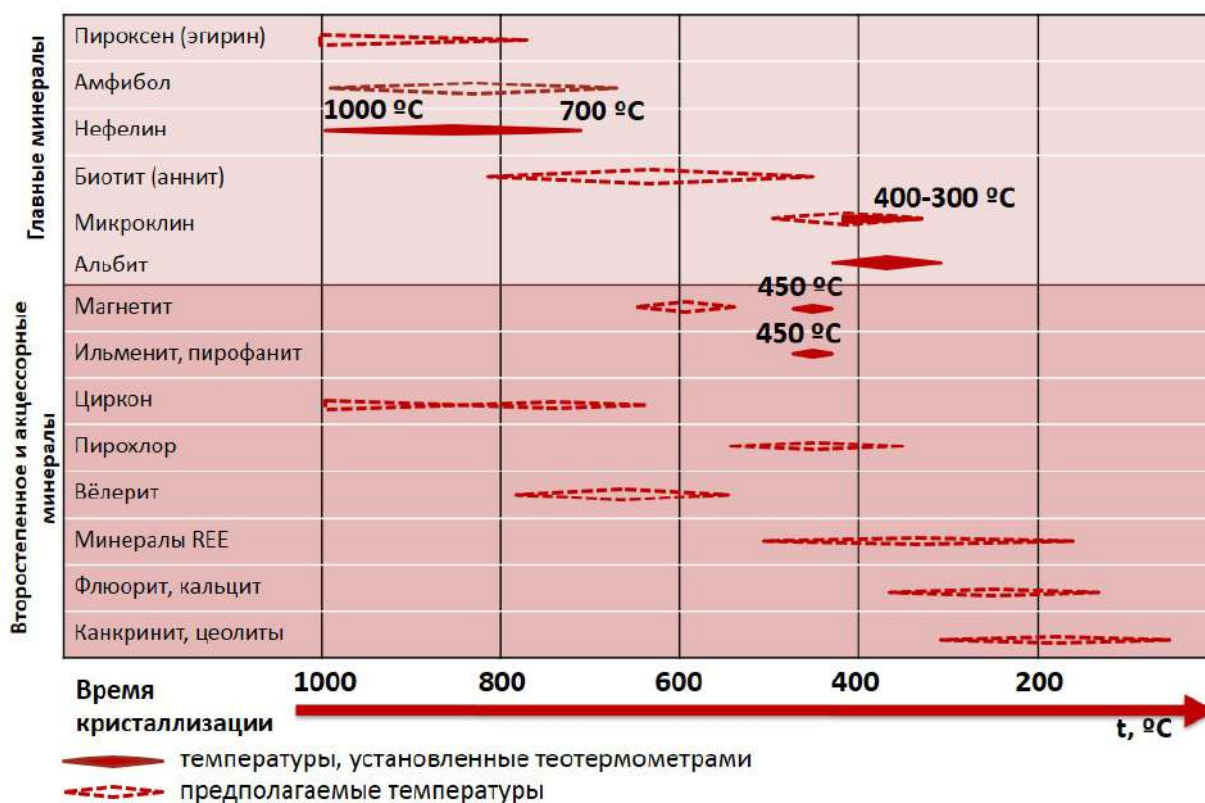


Рис. 5.2. Генетическая диаграмма пегматитов Сагасан с указанием температуры кристаллизации минералов

Полученные температуры кристаллизации пегматитового тела находятся в пределах 1000 — 300 °C. В этом интервале были сформированна основная масса пегматитового тела. Дополнив генетическую диаграмму (рис. 5.1) температурными отметками, полученными с помощью геотермометров, можно предположить и температуре кристаллизации остальных минералов (рис. 5.2). Кристаллизация пегматитов проходила медленно, при постепенно понижающейся температуре. Об этом свидетельствует плавное понижение температуры кристаллизации внутри одного кристалла нефелина, гигантозернистая структура. Окончание процесса формирования пегматита, вероятно, происходило при очень низких температурах.

5.2 Сравнение пегматитов Сагасен с миаскитовыми пегматитами Ильменских гор

Миаскитовые пегматиты Ильменских горы и пегматиты Сагасен различаются по набору и соотношению главных и акцессорных минералов. Пегматиты Сагасен одновременно содержат минералы-индикаторы миаскитовых и агпаитовых пород, их можно считать переходными, что согласуется с литературными данными (Khomyakov, 1995; Piilonen et al., 2012). Ильменские пегматиты содержат минералы-индикаторы, характерные исключительно для миаскитовых пород. Сравнительный анализ минерального состава образцов миаскитовых пегматитов Лангесунфьодра и Ильменских гор приве-

дены в таблице 5.1. Результаты сравнения пегматитов:

1. Нефелин, альбит, микроклин, аннит – главные породообразующие минералы обоих пегматитов.
2. Нефелин в пегматитах Сагасен преимущественно идиоморфный, зеленого или мясо-красного цвета; полевые шпаты ксеноморфны, представлены альбитом и микроклином. Нефелин и полевые шпаты Ильмен образуют индукционные поверхности. Идиоморфные кристаллы нефелина встречаются только в полостях. Цвет нефелина серый, серо-зеленый, красноватый.
3. Пегматиты Сагасен содержат пироксены (эгирин, эгирин-авгит) и амфиболы (ферроэденит, феррогорнблендит, эпидидимит), образующих крупные (до 10 см) кристаллы правильной формы. В миаскитовых пегматитах Ильмен пироксены не отмечены, из амфиболов обнаружен только магнезиогастингсит.
4. Общими акцессорными минералами являются циркон, минералы группы пирохлора, титанит и некоторые другие (табл. 5.1). В ильменских пегматитах шире представлена группа сложных оксидов - бетафит, эшинит-(Ce), колумбит-(Fe). В пегматитах Сагасен более разнообразны островные силикаты и цирконосиликаты – велерит, йортдалит, церит.
5. Редкоземельные элементы в обоих пегматитах концентрируют минералы группы пирохлора и карбонаты. Однако, в пегматитах Сагасен также встречаются бритаолит, церит, собственные минералы Y – капшеленит-(Y), ксенотим; в ильменских пегматитах - минералы группы эпидота – аланит-(Ce), аланит-(La).
6. В обоих пегматитах вторичные изменения проявлены развитием шпреуштейна по нефелину, окислы железа и марганца в большей степени проявлены в ильменских пегматитах.

Вероятно, большее минеральное разнообразие пегматитов Сагасен связано с большим разнообразием вмещающих пород, химизм которых влиял на формирующие пегматиты (Sunde et al., 2018). Для пегматитов Сагасен большинство точек на диаграмме определения температуры кристаллизации по нефелину соответствуют 700–1000 °C. Разброс значений для пегматитов Ильменских гор меньше – 750 – 900°C, что согласуется с литературными данными (Симанов, 1981). По двуполевошпатовому геотермометру получены температуры 350°C для пегматитов Сагасен и 410°C для миаскитовых пегматитов Ильменских гор. Полевые шпаты пегматитов Сагасен ксеноморфны, а Ильменских гор – идиоморфны. Это согласуется с полученными значениями.

Температуры образования пегматитов близки – среднее значение составляет 800°C. Разброс значений может говорить о динамике процесса. Пегматиты Сагасен формировались медленно, о чем свидетельствует гигантокристаллическая структура, плавное

Таблица 5.1. Сравнение минерального состава миаскитовых пегматитов Лангусунфьорда и Ильменских гор (Larsen, 2010, Попов и Попова, 2008)

	Лангесунфьорд	Ильменские горы
Сульфиды	Халькопирит, пирит	
	Арсенопирит, галенит, сфалерит, молибденит	Пирротин
Оксиды	Ильменит, магнетит, минералы группы пирохлора	
	Бадделейт, ториянит, пирофанит	Бетафит, эшинит-(Ce), колумбит-(Fe), герцинит, корунд, рутил, гематит
Гидроксиды	Диаспор, гётит, гиббсит, лепидокрокит, нордстрандит	
	Бехоит, бёмит	Гидроксиды Mn
Островные силикаты	Циркон, титанит	
	Вёлерит, йортдалит, торит, церит-(Ce), бритолит-(Ce), бритолит-(Ce), капеленит-(Y), лавенит, тритомит-(Ce), гизингерит	
Кольцевые силикаты	Эвдиалит, феррокейтбруксит, гренадит	Алланит-(Ce), алланит-(La)
Цепочечные силикаты	Эгирин, эгирин-авгит, астрофиллит, куплетскит, пектолит, таджикит-(Ce)	
Ленточные силикаты	Магнезиогастингсит	
	Ферро-эдениит, феррогортблендит, эпидидимит	Ферримагнезиогортблендит
Кольцевые силикаты	Эвдиалит, феррокейтбруксит, гренадит	Алланит-(Ce), алланит-(La)
Слоистые силикаты	Мусковит, аннит, галлуазит, каолинит	
	Гониерит, пеннантит, шамозит, неотокит, полилитоинит	Вермикулит, иллит
Каркасные силикаты и аналоги	Микроклин, альбит, нефелин, анальцит, канкринит, натролит, содалит, гейландит-(Ca), гоннардит	
		Мезолит, сколецит, мариалит, олигоклаз, ортоклаз, филлипсит-(K), вишневит, цельзиан
Фосфаты	Фторапатит	
	Монацит-(Ce), ксенотим-(Y)	

Карбонаты	Кальцит, анкилит-(Ce)	
	Бастнезит, бербанкит, гидроцеруссит, паризит-(Ce)	Доломит, карбоцернаит, синхизит
Сульфаты	Гипс	
	Берборит	Копиапит, ярозит
Фосфаты	Флюорит	

понижение температуры в кристалле нефелина. Ильменские пегматиты формировались при температуре 750 — 900 °С и, вероятно, при более быстром процессе.

Заключение

Точные инструментальные методы позволили установить в пегматитах Сагасен 43 минерала, принадлежащих к 8 различным классам.

Первыми кристаллизовались эгирин, нефелин, феррогорнблендит, затем аннит, магнетит, ильменит, полевые шпаты. Поздние минералы представлены кальцитом, флюоритом, цеолитами.

Определена температура формирования пегматитов Сагасен с помощью минеральных термометров (кристаллизация минералов: микроклин, альбит – 350-400 °С, нефелин – 700-1000 °С; распад твердого раствора: магнетит-ильменит – 450 °С)

Проведено сравнение пегматитов Сагасен с миаскитовыми пегматитами Ильменских гор. Температуры образования пегматитов близки – среднее значение по нефелину составляет 800°С, по двуполевошпатовому термометру – 350-400 °С. Однако разброс значений в пегматитах Ильменских гор значительно меньше. Минеральный состав пегматитов существенно различается. Пегматиты Сагасен являются более агпаитовыми: в них одновременно присутствуют минералы-индикаторы миаскитовых и агпаитовых пород (циркон, титанит и минералы группы эвдиалита, астрофиллита.)

Основные результаты были опубликованы в сборниках тезисов всероссийских конференций:

1. Головки О.В., Верещагин О.С. Определение термодинамических параметров формирования миаскитовых пегматитов Сагасен // Материалы XXIX молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова. 2018. 28 - 32 с.;
2. Головки О.В., Верещагин О.С. Минералогия и условия образования пегматитов Сагасен // Материалы XVI молодежной научно-практической конференции «Современные исследования в геологии». 2018. 52 - 54 с.;
3. Сравнительная минералого-геохимическая характеристика миаскитовых пегматитов Ильменских гор (Россия) и Лангесунфьорда (Норвегия). Головки О. В., Верещагин О. С., Рассомахин М. А. // Металлогения древних и современных океанов–2019. Четверть века достижений в изучении субмаринных месторождений. Миасс: ИМин УрО РАН, 2019.

Приложение

Расчет формул минералов (Булах, 1964, Булах и др., 2014)

Таблица 5.2. Химический состав эгирина (вес., %)

Образец	L-01-1				L-04-1	L-10-2	L-06-1	L-07-1	L-07-2
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Na ₂ O	13,15	9,6	11,26	11,56	9,1	13,27	12,43	12,55	11,99
MgO		1,64	1,07	0,72	1,75				
Al ₂ O ₃	1,2	0,94	1,04	0,98	1,25	3,91	0,98	1,18	1,17
SiO ₂	52,78	52,29	52,38	52,09	53,15	54,04	51,98	50,77	51,55
CaO		6,38	3,17	2,63	7,71		1	0,31	1,26
TiO ₂		0,42	0,35	0,45	0,6	1,24			
MnO		0,87	0,78	0,77	1,04		0,24	0,23	2,28
FeO	30,59	27,17	27,65	28,08	25,8	26,57	29,34	29,28	26,96
Сумма	97,71	99,3	97,7	98,13	100,41	99,02	95,97	94,3	95,21
Формульные коэффициенты, рассчитанные на 4 катиона									
Na	0,97	0,71	0,84	0,86	0,67	0,96	0,94	0,96	0,91
Mg	0,00	0,09	0,06	0,04	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,00	0,26	0,13	0,11	0,31	0,00	0,04	0,01	0,05
сумм	0,97	1,06	1,03	1,01	1,08	0,96	0,98	0,97	0,96
Mn	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00	0,01	0,01	0,08
Fe ²⁺	0,10	0,31	0,22	0,19	0,40	0,30	0,14	0,09	0,11
Al	0,05	0,04	0,05	0,04	0,06	0,17	0,04	0,05	0,05
Fe ³⁺	0,90	0,69	0,78	0,81	0,60	0,70	0,86	0,91	0,89
Ti	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00
сумм	1,05	1,08	1,08	1,08	1,11	1,21	1,05	1,06	1,13
Si	2,01	1,99	2,01	2,00	2,00	2,01	2,02	2,00	2,02

Таблица 5.3. Химический состав микроклина (вес., %)

Образец	L-1-1			L-10-2		L-10-1		L-04-1		L-06-1	
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
NaO	0,35	0,50	0,43	0,62	0,36	0,73	0,39	0,41	0,46	0,48	
Al ₂ O ₃	18,61	18,1	18,33	18,56	18,59	18,6	18,95	18,87	18,18	17,95	
SiO ₂	66,42	64,73	64,64	64,81	64,67	65,87	64,56	65,95	63,66	64,07	
K	16,71	16,57	16,11	16,17	16,72	16,24	16,78	16,49	16,24	15,92	
Сумма	102,1	99,9	99,51	100,15	100,34	101,44	100,68	101,73	98,55	98,65	

Формульные коэффициенты, рассчитанные на 5 катионов

Na	0,03	0,03	0,04	0,06	0,03	0,06	0,03	0,04	0,04	0,04
Al	0,99	1,01	1,00	1,01	1,01	1,00	1,02	1,01	1,00	0,99
Si	3,01	2,98	3,00	2,99	2,98	3,00	2,96	3,00	2,98	3,00
K	0,97	0,98	0,95	0,95	0,98	0,94	0,98	0,96	0,97	0,95

Таблица 5.4. Химический состав альбита (вес., %)

Образец	L-01-1		L-10-2		L-10-1		L-04-1		L-06-1	
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NaO	11,31	11,02	11,28	11,11	11,44	11,3	11,46	11,57	11,3	11,16
Al ₂ O ₃	19,44	19,63	19,86	19,91	19,91	19,89	19,95	19,57	19,15	19,33
SiO ₂	69,49	68,32	70,09	69,64	70,44	69,89	70,15	70,24	68,52	68
K ₂ O	0,17		0,2		0,21					0,14
FeO			0,29				0,39	0,5		0,47
Сумма	100,41	98,96	101,72	100,66	102,01	101,08	101,96	101,87	98,97	99,11

Формульные коэффициенты, рассчитанные на 5 катионов

Na	0,96	0,95	0,94	0,94	0,95	0,95	0,96	0,97	0,97	0,96
Al	1,00	1,03	1,01	1,02	1,01	1,02	1,01	0,99	1,00	1,01
Si	3,03	3,03	3,02	3,04	3,03	3,03	3,02	3,02	3,03	3,01
K	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Fe	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,02

Таблица 5.5. Химический состав нефелина (вес., %)

Образец	L-04-1				L-10-1			L-10-2		
№	4750	4759	4789	4674	4705	4719	4573	4576	4616	4581
NaO	15,44	15,85	15,78	15,67	15,89	16,2	15,77	15,71	16,17	16
Al ₂ O ₃	33,25	32,57	32,57	33,32	32,59	32,51	34,53	33,27	32,95	33,58
SiO ₂	44,88	45,17	45,13	44,26	45,31	45,75	43,72	44,78	46,24	44,65
K ₂ O	5,9	5,65	5,43	6,25	5,52	5,63	6,93	6,26	5,77	6,25
FeO	0,65	0,84	0,77	0,44	0,78	0,69		0,74	0,62	0,74
Сумма	100,13	100,1	99,68	99,95	100,1	100,79	100,95	100,76	101,75	101,22
Формульные коэффициенты, рассчитанные на 3 катиона										
Na	0,76	0,75	0,75	0,75	0,76	0,76	0,74	0,74	0,76	0,75
K	0,17	0,18	0,17	0,20	0,17	0,17	0,21	0,19	0,18	0,19
FeO	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01
Na+K	0,93	0,93	0,93	0,94	0,93	0,94	0,95	0,94	0,93	0,94
Al	0,94	0,94	0,95	0,96	0,94	0,93	0,99	0,96	0,94	0,96
Si	1,11	1,11	1,11	1,09	1,11	1,11	1,06	1,09	1,12	1,08

Таблица 5.6. Химический состав мусковита и аннита (вес., %)

Образец	L-06-1		L-10-1		L-10-2		L-01-1		L-04-1	L-06-1	L-10-2
№	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
Na ₂ O	0,38	0,46	0,63	1,06	0,23			0,30			
MgO						7,04	6,67	1,61	0,59		
Al ₂ O ₃	38,20	37,49	37,93	39,07	38,62	10,86	10,28	11,06	11,27	16,16	
SiO ₂	43,03	43,57	45,40	43,43	43,12	38,15	37,81	34,64	34,21	35,52	
K ₂ O	11,20	11,19	11,13	10,55	11,25	9,89	9,75	9,24	9,11	9,45	
Ti						2,86	2,65	3,82	3,93		
MnO						2,70	3,05	2,03	2,55	1,88	
FeO	0,77	0,40			0,95	25,23	25,67	32,35	34,14	32,75	
Сумма	93,58	93,10	95,09	94,12	94,17	96,72	95,86	95,05	95,78	95,76	
Формульные коэффициенты, рассчитанные на 7 (Му) на 8 (Апп) катионов											
Na	0,05	0,06	0,08	0,14	0,03	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	
K	0,97	0,97	0,95	0,92	0,96	0,89	0,89	0,85	0,83	0,85	
Σ _{Na,K}	1,02	1,03	1,03	1,06	0,99	0,89	0,89	0,89	0,83	0,85	
Mg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	0,71	0,17	0,06	0,00	
Fe ²⁺	0,07	0,04	0,00	0,00	0,09	2,16	2,17	2,71	2,77	2,69	
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,19	0,12	0,16	0,11	
Σ _{Mg,Mg,Fe}						3,06	3,06	3,00	2,99	2,81	
Al	3,05	3,02	3,00	3,14	3,06	0,90	0,86	0,94	0,95	1,34	
Si	2,91	2,97	3,05	2,96	2,89	2,69	2,69	2,50	2,44	2,51	
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,14	0,21	0,21	0,00	
Fe ³⁺						0,30	0,35	0,51	0,58	0,49	

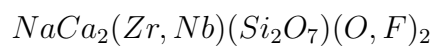
Таблица 5.7. Химический состав бритолита-(Ce) (вес., %)
 $(Ce, Ca)_5(SiO_4)_3(OH)$

№	1	2		1	2
SiO ₂	19,93	19	Pr ₂ O ₃	2,29	1,85
P ₂ O ₅	1,90	2,73	Nd ₂ O ₃	5,65	5,34
CaO	13,18	14,44	Sm	0,89	
La ₂ O ₃	17,14	16,19	ThO ₂	6,84	6,47
CeO	27,14	26,15	Сумма	94,96	92,17
Формульные коэффициенты, рассчитанные на 8 катионов					
Ca	1,90	2,09	Si	2,68	2,57
La	0,85	0,81	P	0,22	0,31
Ce	1,41	1,36	$\sum_{Si,P}$	2,90	2,88
Pr	0,00	0,00			
Nd	0,27	0,26			
Sm	0,04	0,00			
Yb	0,42	0,40			
Th	0,21	0,20			
$\sum_{\text{катионов}}$	5,10	5,12			

Таблица 5.8. Химический состав бурбанкита (вес., %)
 $(Na, Ca)_3(Sr, Ba, Ce)_3(CO_3)_5$

Образец				L-01-1			
№	1	2	3		1	2	3
Na ₂ O	9,15	8,81	6,53	Ba	7,88	7,95	8,50
Al ₂ O ₃		0,70		La	8,00	7,88	7,84
SiO ₂	1,09	2,65	1,13	Ce	11,76	12,28	11,80
K ₂ O	0,64	1,02	0,40	Nd	3,16	2,29	2,74
CaO	2,95	2,81	3,28	Th	0,64	1,10	0,91
SrO	13,85	11,97	11,15	Сумма	59,54	59,45	54,27
Формульные коэффициенты, рассчитанные на 6 катионов							
Na	2,52	2,38	2,11	Ba	0,44	0,43	0,56
Al	0,00	0,12	0,00	La	0,42	0,41	0,48
Si	0,15	0,37	0,19	Ce	0,64	0,66	0,76
K	0,06	0,09	0,04	Nd	0,16	0,11	0,16
Ca	0,45	0,42	0,59	Th	0,02	0,03	0,03
Sr	1,14	0,97	1,08	Na+Ca	3,02	2,90	2,74

Таблица 5.9. Химический состав вёлерита (вес., %)



Образец	L-06-1				
№	1	2	3	4	5
Na ₂ O	7,48	7,39	7,46	7,53	7,19
SiO ₂	29,34	29,59	29,56	29,44	28,92
CaO	25,88	25,83	25,51	25,85	25,30
TiO ₂	0,68	0,81	0,66	0,67	0,90
MnO	1,64	1,51	1,38	1,53	1,45
FeO	1,30	1,55	1,41	1,31	1,32
Zr	14,01	13,91	14,47	14,00	13,76
Nb ₂ O ₅	13,20	12,82	13,25	13,18	11,49
Сумма	93,52	93,42	93,70	93,51	90,31
Формульные коэффициенты, рассчитанные на 6 катионов					
Na	1,00	0,98	0,99	1,00	0,99
Ca	1,90	1,90	1,88	1,90	1,92
Fe ²⁺	0,07	0,09	0,08	0,08	0,08
$\sum_{Ca, Fe}$	1,98	1,99	1,96	1,98	1,99
Zr	0,47	0,47	0,49	0,47	0,47
Nb	0,41	0,40	0,41	0,41	0,37
Ti	0,04	0,04	0,03	0,03	0,05
Mn	0,10	0,09	0,08	0,09	0,09
$\sum_{Zr, Nb, Ti, Mn}$	1,01	0,99	1,01	1,00	0,98
Si	2,02	2,03	2,03	2,02	2,04

Таблица 5.10. Химический состав пироклора (вес., %)



Образец	L-06-1			L-07-1			L-07-2		
№	4811	4877	4892	4902	4911	5014	5031	5063	5085
Na ₂ O	5,87	5,78	5,78	6,71	6,77	6,75	7,00	7,29	7,12
CaO	18,14	15,42	15,07	11,88	12,55	12,21	13,16	13,04	12,62
TiO ₂	6,68	7,28	7,13	5,97	5,32	5,63	4,94	6,22	5,46
FeO	0,63	0,88							
ZrO ₂	1,73			1,63	2,05	2,16		1,98	2,33
Nb ₂ O ₅	56,34	54,04	54,52	53,31	55,01	53,51	58,96	55,58	55,02
La ₂ O ₃		1,31	1,46	1,78	1,77	1,66	1,46	1,81	1,41
CeO	1,33	2,42	2,50	3,71	3,35	3,61	2,90	3,39	3,46
Nd ₂ O ₃			0,66	0,88	0,67	0,75	0,38	0,83	
Ta ₂ O ₅		2,82	3,07	1,70	2,61	1,49	1,66	1,86	1,53
W ₂ O ₃			1,34						
ThO ₂		3,70	3,84				0,93		
Сумма	92,21	93,64	95,36	88,13	90,10	88,39	91,91	92,58	89,65
Формульные коэффициенты									
№	4811	4877	4892	4902	4911	5014	5031	5063	5085
Na	0,73	0,73	0,72	0,87	0,86	0,88	0,88	0,90	0,90
Ca	1,24	1,08	1,04	0,85	0,88	0,88	0,91	0,89	0,89
Fe	0,03	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
La	0,00	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03
Ce	0,03	0,06	0,06	0,10	0,08	0,09	0,07	0,08	0,09
Th	0,00	0,05	0,06	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
A	2,03	2,00	1,92	1,89	1,88	1,90	1,93	1,94	1,91
Zr	0,05	0,00	0,00	0,05	0,07	0,07	0,00	0,06	0,07
Nb	1,63	1,59	1,58	1,61	1,63	1,62	1,73	1,61	1,63
Ti	0,32	0,36	0,34	0,30	0,26	0,28	0,24	0,30	0,27
Nd	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,00
Ta	0,00	0,05	0,05	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03
W	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

Литература

- Жданов, В. В., Костин, А. Е., Кухаренко, Е. А., Ланда, Э. А., Лукьянова, Л. И., 2009. Петрографический кодекс России. Санкт-Петербург.
- Булах, А. Г., Золотарёв, А. А., Кривовичев, В. Г., 2014. Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов.
- Булах, А. Г., Лоудес, Х., Панова, Е. Г., 2013. Голубой перламутр — новый, нет! — старый декоративный камень Петербурга. Реликвия 30, 6–11.
- Каменцев, И. Е., Сметанникова, О. Г., 1984. Руководство по рентгеновскому исследованию полевых шпатов. Ленинград.
- Попов, В. А., Попова, В. И., 2006. Минералогия пегматитов Ильменских гор. Москва.
- Булах, А. Г., 1964. Расчет формул минералов. Ленинград.
- Рябчиков, И. Д., 1965. Усовершенствование полевошпатового геологического термометра Барта, in: Минералогическая термометрия и барометрия, pp. 49–60.
- Гордиенко, В. В., 1976. Слюдonoносные пегматиты Северной Карелии. Ленинград.
- Симанов, В. А., 1981. Условия минералообразования в негранитных пегматитах. Новосибирск.
- Пономарева, Н. И., 2014. Оценка Р-Т параметров процессов минералообразования на основе геотермометров. Методическое пособие. Санкт-Петербург.
- Барт, Т., 1962. Измерение палеотемператур гранитных пород.
- Перчук, А. Л., 2014. Основы петрологии магматических и метаморфических процессов. Москва.
- Andersen, D. J., Lindsley, D. H., 1985. New (and final!) models for the Ti-magnetite/ilmenite geothermometer and oxygen barometer. American Geophysical Union . 66 (18), 416.
- Andersen, T. B., Erambert, M., Larsen, A. O., Selbekk, R. S., 2010. Petrology of Nepheline Syenite Pegmatites in the Oslo Rift, Norway: Zirconium Silicate Mineral Assemblages as Indicators of Alkalinity and Volatile Fugacity in Mildly Agpaitic Magma. Journal of Petrology 51, 2303–2325. URL: <https://academic.oup.com/petrology/article-lookup/doi/10.1093/petrology/egq058>, doi:10.1093/petrology/egq058.
- Andersen, T. B., Nilsen, O., Larsen, A. O., 2008. Eurogranites /IGCP 510 field trip , 1–54.

- Anderson, A. T., 1968. Oxidation of the La Blanche Lake titaniferous magnetite deposit, Québec. *Journal of Geology* 76 (4), 528–547.
- Atencio, D., Andrade, M. B., Christy, A. G., Gieré, R., Kartashov, P. M., 2010. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. *The Canadian Mineralogist* 48, 673–698. URL: <http://www.canmin.org/cgi/doi/10.3749/canmin.48.3.673>, doi:10.3749/canmin.48.3.673.
- Bellezza, M., Franzini, F., Larsen, A. O., Merlino, S., Perchiazzi, N., 2004. Grenmarite, a new member of the götzenite-seidozerite-rosenbuschite group from Langesundsfjord district: definition and crystal structure. *European Journal of Mineralogy* 16, 971–978.
- Berzelius, J., 1829. Ueber den Thorit, ein neues Mineral, und eine darin enthaltene neue Erde, die Thorerde. *Annalen der Physik und Chemie* 15, 633–634.
- Berzelius, J., 1835. Aegerin (Esmark). *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geognosie, Geologie und Petrefaktenkunde*, 184–185.
- Bowles, J. F. W., 1977. A Method of Tracing the Temperature and Oxygen-Fugacity Histories of Complex Magnetite-Ilmenite Grains. *Mineralogical Magazine* 41, 103–109. URL: <http://www.minersoc.org/pages/Archive-MM/Volume{ }41/41-317-103.pdf>, doi:10.1180/minmag.1977.041.317.15.
- Brøgger, W.C., 1890. Die Mineralien der Syenitpegmatitgänge der südnorwegischen (in German). Augit- und Nephelinsyenite. *Zeitschrift für Kristallographie* 16, 1–235, 1–663.
- Brøgger, W. C., 1884. Foreløbig meddelelse om to nye norske mineraler, Låvenit og Cappelinit. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* (in Norwegian 7, 598–600.
- Brøgger, W. C., 1887a. Foreløbig meddelelse om mineralerne på de sydnorske augit- og nefelinsyeniters grovkornige gange. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* (in Norwegian) 9, 247–274.
- Brøgger, W. C., 1887b. Foreløbig meddelelse om mineralerne på de sydnorske augit- og nefelinsyeniters grovkornige gange. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* (in Norwegian) 9, 247–274.
- Brøgger, W. C., 1887c. Om „eudidymit“, et nyt norsk mineral. 31, 196–199.
- Brown, W. L., Parsons, I., 1989. Alkali Feldspars: Ordering Rates, Phase Transformations and Behaviour Diagrams for Igneous Rocks. *Mineralogical Magazine* 53, 25–42. doi:10.1180/minmag.1989.053.369.03.

- Buddington, A. F., Lindsley, D. H., 1964. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *Journal of Petrology* 5, 310–357.
- Carmichael, I. S. E., 1967. The iron-titanium oxides of salic volcanic rocks and their associated ferromagnesian silicates. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 14 (1), 36–64.
- Erdmann, A., 1840. Undersökning af leucophan, ett nytt mineral från trakten af Brewig i Norrige. *Kongliga Svenska Vetenskaps- Akademiens Handlingar* (in Swedish) , 191– 200.
- Friis, H., Larsen, A. O., Kampf, Anthony R., Evans, R. James, Selbekk, Rune S., Sánchez, A. Aranda, Kihle, Jan, 2014. Peterandresenite, a new mineral containing the Lindqvist ion from a syenite pegmatite of the Larvik Plutonic Complex, southern Norway. *European Journal of Mineralogy* 26, 567–576. URL: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=0935-1221&volume=26&issue=4&spage=567>, doi:10.1127/0935-1221/2014/0026-2385.
- Friis, H., Weller, M. T., Kampf, A. R., 2017. Hanesmarkite, a new hexaniobate from a syenite pegmatite in the Larvik Plutonic Complex, southern Norway. *Mineralogical Magazine* 81, 543–554. URL: <http://www.ingentaconnect.com/content/10.1180/minmag.2016.080.109>, doi:10.1180/minmag.2016.080.109.
- Grice, J. D., Kristiansen, R., Friis, H., Rowe, R., Cooper, M. A., Poirier, G. G., Yang, P., Weller, M. T., 2017. Hydroxylgugiaite: A New Beryllium Silicate Mineral From the Larvik Plutonic Complex, Southern Norway and the Ilímaussaq Alkaline Complex, South Greenland; The First Member of the Melilite Group To Incorporate A Hydrogen Atom. *The Canadian Mineralogist* 55, 219–232. URL: <http://www.canmin.org/lookup/doi/10.3749/canmin.1700002>, doi:10.3749/canmin.1700002.
- Grice, J. D., Kristiansen, R., Friis, H., Rowe, R., Poirier, G. G., Selbekk, R. S., Cooper, M. A., Larsen, A. O., 2013. Ferrochiavennite, a new beryllium silicate zeolite from syenite pegmatites in the larvik plutonic complex, Oslo Region, Southern Norway. *The Canadian Mineralogist* 51, 285–296. URL: <http://www.canmin.org/cgi/doi/10.3749/canmin.51.2.285>, doi:10.3749/canmin.51.2.285.
- Hamilton, D. L., 1961. Nephelines as Crystallization Temperature Indicators. *The University of Chicago Press* 69, 321–329.
- Heldal, Tom, Kjølle, Idunn, Meyer, Gurli B, Dahlgren, Sven, 2008. National treasure of global significance. Dimension-stone deposits in larvikite, Oslo igneous province, Norway URL: <http://www.ngu.no/upload/publikasjoner/Specialpublication/SP11{ }02{ }Heldal.pdf>.

- Ihlen, P. M., Schiellerup, H., Gautneb, H., Skår, Ø., 2014. Characterization of apatite resources in Norway and their REE potential - A review. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016913681300259X>, doi:10.1016/j.oregeorev.2013.11.003.
- Karin, H., Gorbatshev, R., Nystr, J., Wikstr, A., Bergman, S., Ahl, M., Mansfeld, J., Wahlgren, C., Stephens, M. B., Claeson, D. T., Eklund, O., Lundqvist, T., 2004. The Transscandinavian Igneous Belt (TIB) in Sweden: a review of its character and evolution. Geol. Surv. Finland .
- Khomyakov, A. P., 1995. Mineralogy of Hyperagpaitic Alkaline Rocks. Clarendon ed., Oxford Scientific Publications, Oxford.
- Khomyakov, A. P., Camara, F., Sokolova, E., Abdu, Y., Hawthorne, F. C., 2011. Sveinbergeite, a new astrophyllite-group mineral from the Larvik Plutonic Complex, Oslo Region, Norway: description and crystal structure. Mineralogical Magazine 75, 2687–2702. URL: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=0026-461X&volume=75&issue=5&spage=2687>, doi:10.1180/minmag.2011.075.5.2687.
- Larsen, A. O., 1992. Tvedalite, new mineral from syenite pegmatite in the Oslo Norway. American Mineralogist 77, 438–443.
- Larsen, A. O., 2010. The Langsundsfjord , 239.
- Larsen, A. O., Kolitsch, U., Gault, R. A., Giester, G., 2010. Eirikite, a new mineral species of the leifite group from the Langesundsfjord district, Norway. European Journal of Mineralogy 22, 875–880. URL: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=0935-1221&volume=22&issue=6&spage=875>, doi:10.1127/0935-1221/2010/0022-2068.
- Larsen, B. T., Olaussen, S., Sundvoll, B., Heeremans, M., 2008. The Permo-Carboniferous Oslo Rift through six stages and 65 million years 31, 52–58. URL: <http://folk.uio.no/rtronnos/OsloRift-excursion-articl/Episodes08-Larsen-OsloRift-rev.pdf>.
- Lepage, L. D., 2003. ILMAT: an excel worksheet for ilmenite–magnetite geothermometry and geobarometry. Comput. Geosci. 29 (5), 673–678.
- Marks, M. A. W., Markl, G., 2017. A global review on agpaitic rocks. Earth-Science Reviews 173, 229–258. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012825217301344>, doi:10.1016/j.earscirev.2017.06.002.
- Müller, B. A., Husdal, T. B., Sunde, Ø., Friis, H., Andersen, T. B., Johansen, T. S., Werner, R., Thoresen, Ø., Olerud, S., 2017. Norwegian pegmatites I: Tysfjord-Hamarøy, Evje-Iveland, Langgesundsfjord.

- Paijkull, S. R., 1876. Homilit, ett mineral från Brevig I Norge. Geologiska Föreningens I Stockholm Förhandlingar (in Swedish) 3, 229–232.
- Parsons, I., Lee, M. R., 2005. Minerals are not just chemical compounds. Canadian Mineralogist 43, 1959–1992. doi:[10.2113/gscanmin.43.6.1959](https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.1959).
- Piilonen, P. C., McDonald, A. M., Poirier, G. G., Rowe, R., Larsen, A. O., 2012. The mineralogy and crystal chemistry of alkaline pegmatites in the Larvik Plutonic Complex, Oslo rift valley, Norway. Part 1. Magmatic and secondary zircon: implications for petrogenesis from trace-element geochemistry. Mineralogical Magazine 76, 649–672. URL: <http://www.ingentaconnect.com/content/minsoc/mag/2012/00000076/00000003/art00015>, doi:[10.1180/minmag.2012.076.3.15](https://doi.org/10.1180/minmag.2012.076.3.15).
- Piilonen, P. C., McDonald, A. M., Poirier, G. G., Rowe, R., Larsen, A. O., 2013. Mafic minerals of the alkaline pegmatites in the Larvik plutonic complex, Oslo rift, Southern Norway. The Canadian Mineralogist 51, 735–770. URL: <http://www.canmin.org/lookup/doi/10.3749/canmin.51.5.735>, doi:[10.3749/canmin.51.5.735](https://doi.org/10.3749/canmin.51.5.735).
- Powell, R., Powell, M., 1977. Mineralogical Magazine, 1977. Geothermometry and oxygen barometry using coexisting iron-titanium oxides: a reappraisal. Mineralogical Magazine 41(318), 257–263.
- Raade, G., Åmli, R., Mladeck, M. H., Din, V. K., Larsen, A. O., Åsheim, A., 1983. Chiavennite from syenite pegmatites in the Oslo Region, Norway. American Mineralogist 68, 628–633.
- Raade, G., Grice, J. D., Cooper, M. A., 2009. Alflarsenite, a new beryllium-silicate zeolite from a syenitic pegmatite in the Larvik plutonic complex, Oslo Region, Norway. European Journal of Mineralogy 21, 893–900. URL: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=0935-1221&volume=21&issue=4&spage=893>, doi:[10.1127/0935-1221/2009/0021-1946](https://doi.org/10.1127/0935-1221/2009/0021-1946).
- Sauerzapf, U., Lattard, D., Burchard, M., Engelmann, R., 2008. The titanomagnetite-ilmenite equilibrium: New experimental data and thermo-oxybarometric application to the crystallization of basic to intermediate rocks. Journal of Petrology 49, 1161–1185. doi:[10.1093/petrology/egn021](https://doi.org/10.1093/petrology/egn021).
- Scheerer, T., 1843. Ueber den wöhlerite, eine neue mineralspecies; von Th. Scheerer in Christiania. Annalen der Physik und Chemie 59, 327–336.
- Scheerer, T., 1854. Verhandlungen des bergmännischen vereins zu Freiberg. Bergund Hüttenmännische zeitung 13, 239–240.

- Segalstad, T.V., Larsen, A. O., 1978a. Gadolinite-(Ce) from Skien, southwestern Oslo region, Norway. *American Mineralogist* 63, 188–195.
- Segalstad, T. V., Larsen, A. O., 1978b. Gadolinite-(Ce) from Skien, southwestern Oslo region, Norway. *American Mineralogist* 63, 188–195.
- Spencer, K. J., Lindsley, D. H., 1981. A solution model for coexisting iron-titanium oxides. *American Mineralogist* 66 (11-12), 1189–1201.
- Stewart, D. B., Ribbe, P. H., 1969. Structural explanation for variations in cell parameters of alkali feldspar with aluminum/silicon ordering.
- Stormer, Jr., 1983. The effects of recalculation on estimates of temperature and oxygen fugacity from analyses of multi-component iron-titanium oxides. *American Mineralogist* 68 (5-6), 586–594.
- Sunde, Ø., Friis, H., Andersen, T. B., 2018. Variation in major and trace elements of primary wöhlerite as an indicator of the origin of Pegmatites in the Larvik plutonic complex, Norway. *Canadian Mineralogist* 56, 529–542. doi:[10.3749/canmin.1700050](https://doi.org/10.3749/canmin.1700050).
- Weibye, P. H., 1850. Neue mineralien aus Norwegen, beschrieben von P.H. Weibye; analysirt von N.J. Berlin, K.A. Sjögren und J.B. von Borck (Erster Theil.). *Annalen der Physik und Chemie* 79, 299–304.
- Wöhler, F., 1826. Ueber den Pyrochlor, eine neue. Mineralspecies. *Annalen der Physik und Chemie* (in German) 7, 417– 428.